SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© SCIENCEPHOTO.COM/SHUTTERSTOCK PHOTOMONTAGE SETA KRAULTZKI/SHUTTERSTOCK

EFFACER LA DOULEUR

Les nouvelles solutions

p.62

Univers
LA PREMIÈRE SECONDE

p.28

...et avant ?

MAI 2024 - N° 927 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM CAV/DJN) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 927 - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 927 - MAI 2024 - LA PREMIÈRE SECONDE DE L'UNIVERS

PEUGEOT

NOUVEAU E-3008
100 % ÉLECTRIQUE

Le SUV français nouvelle génération
Nouveau Peugeot i-Cockpit® panoramique(1)
527(2) et 680(3) km d'autonomie

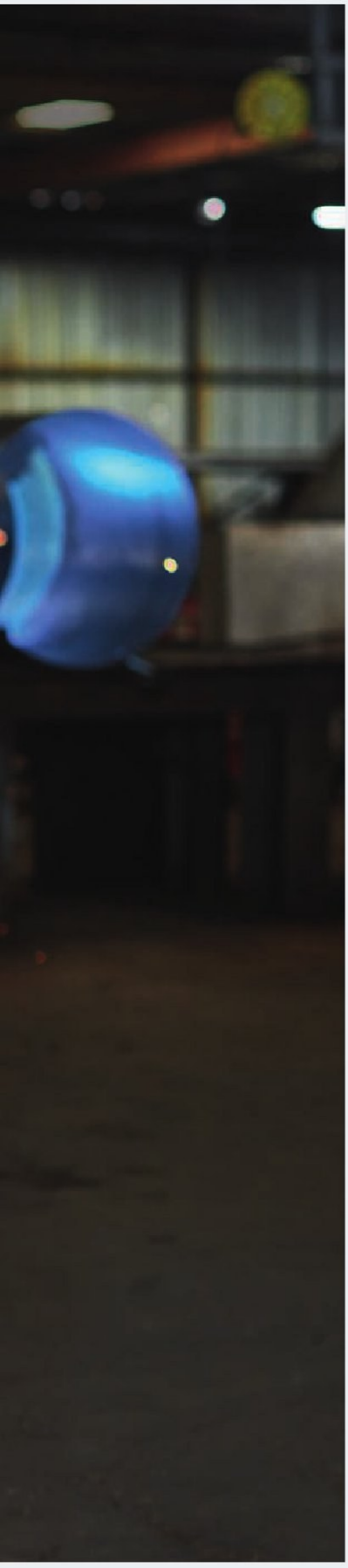
JUSQU'À 8 ANS PEUGEOT ALLURE CARE (4)

Pensez à covoiturer. #SeDéplacerMoinsPolluer

Consommation mixte WLTP (l/100 km) : 0.

(1) De série ou en option selon les versions. (2) pour une version Allure (3): pour une version Allure, en cours d'homologation. (2)(3):Norme WLTP en cycle mixte. L'autonomie de la batterie peut varier en fonction des conditions réelles d'utilisation. Commandez la version avec 527 km d'autonomie maintenant ou pré-réservez la version avec 680 km d'autonomie disponible à la commande ultérieurement (4) Voir conditions Programme Allure Care sur Peugeot.fr. Automobile PEUGEOT 552 144 503 RCS Versailles.

- Shanna Ford
Soudeuse professionnelle



Meta

« Avec la réalité virtuelle, je peux m'entraîner à souder et développer ma mémoire musculaire, chez moi. »

S'entraîner avec la plateforme **ForgeFX** a contribué à améliorer la vie de Shanna Ford en lui permettant d'exercer un métier qu'elle aime et de mener une vie de famille stable.

Le métavers a déjà un impact.

EN SAVOIR PLUS
META.COM/METAVERSEIMPACT/FR

LIMICOL®

L'EFFICACITÉ PROUVÉE CONTRE LE CHOLESTÉROL

Le **premier et le seul** complément alimentaire ayant obtenu une allégation de santé exclusive par l'Union Européenne.*

BÉNÉFICE SANTÉ VALIDÉ
par les autorités européennes

PROUVÉ CLINIQUEMENT

-20%

DE LDL-CHOLESTÉROL DÈS 1 MOIS[1]

FORMULE BREVETÉE
ACTIFS NATURELS
ET VITAMINES

Levure de riz rouge

Extrait d'ail

Extrait d'artichaut

Bénéficiez d'une remise exceptionnelle** de

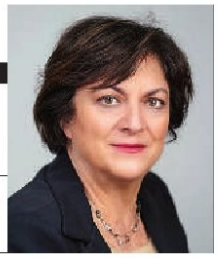
-10%

avec le code **CHOL10**

05 46 56 30 48 | **laboratoire-lescuyer.com** | FORMULATION ET FABRICATION FRANÇAISES

Complément alimentaire à base de monacoline K issue de levure de riz rouge, extraits de plantes et vitamines. Ne doit pas être consommé par les femmes enceintes ou allaitantes, les enfants de moins de 18 ans et les adultes de plus de 70 ans. Si vous avez des problèmes de santé, demandez conseil à votre médecin avant de consommer ce produit.Ne doit pas être consommé en cas de prise de médicaments pour réduire le cholestérol ou si vous consommez déjà d'autres produits contenant de la levure de riz rouge. Ne pas dépasser la dose journalière recommandée (ne pas consommer plus de 3 mg de monacolines par jour). À tenir hors de portée des jeunes enfants. Ne se substitue pas à une alimentation variée, équilibrée et à un mode de vie sain. Plus d'informations sur **www.laboratoire-lescuyer.com**. *La combinaison d'actifs de Limicol® réduit les concentrations de cholestérol LDL dans le sang. Une cholestérolémie LDL élevée constitue un facteur de risque dans le développement des maladies coronariennes. Il existe d'autres facteurs de risque qu'il est également important de surveiller. La modification de l'un de ces facteurs peut ou non avoir un effet bénéfique. Ce produit est destiné aux personnes devant contrôler leur taux de cholestérol sanguin. **Offre valable sur l'ensemble des formats LIMICOL® jusqu'au 30/04/2024. 1 - Réduction moyenne observée lors de 3 études cliniques réalisées sur un total de 184 sujets âgés de 18 à 65 ans, présentant une hypercholestérolémie non traitée : Ogier et al. Eur J Nutr 2013 ; Barrat et al. Int J Food Sci Nutr. 2013 ; Barrat et al. Eur J Nutr 2013

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE. WWW.MANGERBOUGER.FR


BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

Police scientifique

Recherche de la vérité et incertitudes. Tel est le quotidien des scientifiques. Mais il devient particulièrement crucial quand il s'agit de police scientifique. Ces derniers jours l'ont rappelé avec l'affaire du « petit Émile » en une des médias. Chacun sait que l'enquête sur l'enfant disparu du Haut-Vernet (Alpes-de-Haute-Provence) à l'été 2023 a connu un rebondissement sérieux avec l'annonce, le 31 mars, de la découverte la veille et non loin du village d'un crâne qui n'avait pas été vu jusqu'alors. Et, avec ce dernier, ce sont les « sciences forensiques » qui ont fait irruption dans cette investigation.

L'ADN, marqueur par excellence. Ces sciences tirent leur nom du terme latin *forensis*, « devant le forum », où se tenaient les cours de justice. Celles-ci aideront-elles à répondre aux questions que pose l'affaire ? On aura noté le délai très court dans lequel l'Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale (IRCGN) a pu affirmer que le crâne était bien celui de l'enfant. Preuve apportée par l'ADN, le génome étant le marqueur de chaque individu par excellence. Banal ? Il faut rappeler à quel point ce genre d'investigation biologique, devenu incontournable dans les enquêtes judiciaires, requiert une méthodologie rigoureuse, notamment pour éviter toute contamination.

Anthropologie médico-légale. Ce qui aura frappé les esprits est aussi ailleurs. Dans l'appel, pour en savoir plus, à ce qui se nomme anthropologie médico-légale. Une spécialité bien moins connue du grand public qui permet de révéler les traumatismes ayant affecté un squelette. Les griffures, fissures, fractures et autres altérations parlent aux experts. Elles constituent pour eux autant d'indices qui vont jusqu'à dévoiler, ce qui a de quoi surprendre le non-spécialiste, si des lésions ont été occasionnées avant ou après la mort de la victime. Avec moult subtilités à prendre en compte, détérioration de l'os due aux intempéries, à des morsures d'animaux…

Espoir de nouveaux indices. En l'occurrence, les premières analyses n'auront rien détecté de suspect, comme des coups portés au crâne, par exemple. Nécessité donc de disposer d'autres éléments… probants. Des recherches plus approfondies sur le terrain, immédiatement enclenchées, ont conduit vers des vêtements de l'enfant, ouvrant la possibilité de découvrir des indices supplémentaires. Présenteraient-ils des traces, notamment de terre, de plantes, de pollens venus d'autres zones que celle où ils ont été retrouvés ? Voire de nouveaux ADN ?

Multidisciplinarité et patience. À l'heure où nous écrivons, aucune réponse à ces nouvelles questions et l'énigme reste entière, chute de l'enfant, homicide involontaire ou meurtre. L'occasion de rappeler que les sciences forensiques, avec la précision qu'elles se doivent de respecter, ne tiennent pas de la baguette magique. Elles exigent multidisciplinarité et… patience. Contrairement aux séries TV où des experts polyvalents trouvent la clé d'une énigme à vitesse grand V. Ici, il ne s'agit malheureusement pas d'une fiction. ■

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Énergie noire, la force qui déchire l'Univers »

(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 925, mars 2024)

Je suis un lecteur assidu de votre revue, qui convient parfaitement à mes besoins scientifiques. Cependant, dans votre dossier sur l'énergie noire vous n'hésitez pas à considérer que l'énergie est une force. Dans ma mémoire, c'est impossible, le rapport entre les deux ayant la dimension du « temps ». Pouvez-vous m'expliquer comment vous pouvez les confondre ?

Jean-Claude Romain

S. et A. : Pour ce qui est du terme de « force », il s'agit ici d'un raccourci pour un titre, et non d'une définition physique. Mais il se justifie pleinement. En effet, l'énergie peut être vue comme la capacité d'un système à effectuer un travail. Et un travail, c'est une force multipliée par une distance. Le rapport entre énergie et force est donc une distance, et non le temps.

On dit que l'Univers est fait de matière et d'énergie. À ces deux éléments se sont ajoutées depuis peu l'énergie noire et la matière noire. Pourquoi dans le graphique, en page 28 de votre dossier, n'apparaît pas « l'énergie » mais seulement « matière visible », « énergie noire » et « matière noire » ? **Yves Lirette**

S. et A. : Merci pour cette très bonne remarque. En fait, l'énergie « classique », donc celle qui n'est pas « noire », est confondue avec la matière visible. Sachant que matière et énergie sont notamment reliées par le fameux $E = mc^2$...

L'observation de l'explosion des supernovae se réalise en continu alors qu'une explosion est momentanée… Quelle est votre explication ?

Simon Borès

S. et A. : L'explosion d'une étoile en supernova n'est pas instantanée. Elle se produit en plusieurs phases. Puis sa luminosité diminue lentement. Ainsi la supernova SN1054 observée à partir de juillet 1054 a été visible à l'œil nu durant plusieurs mois. Par ailleurs les gaz continuent de se propager longtemps après, si bien que SN1054 est encore visible : c'est la nébuleuse du Crabe, issue de matériaux éjectés lors de l'explosion.

Manque d'oxygène

Dans l'article sur « l'étonnante adaptation du corps à l'altitude » (*S. et A.* n° 926), il est noté que c'est le taux d'oxygène qui baisse de moitié à 5000 m d'altitude. Or il me semble que le taux d'oxygène est constant autour de 21 % dans toute l'atmosphère, quelle que soit l'altitude. C'est la pression atmosphérique qui diminue et entraîne pour un même volume d'air aspiré une quantité moindre d'oxygène et d'azote dans les poumons. Dans les avions, à 10 000 m, on respire normalement, sans ajout d'oxygène mais simplement en comprimant l'air extérieur.

Jean-Paul Chevalier

S. et A. : Vous avez tout à fait raison. Dire qu'il y a moitié moins d'oxygène dans l'air à 5000 m d'altitude est un abus de langage. Comme vous le mentionnez, le taux d'oxygène dans l'atmosphère est constant à environ 21 %. En revanche, sa pression partielle diminue avec l'altitude, ce qui le rend de moins en moins disponible pour être absorbé par notre organisme. Cet effet est dû à la baisse de la pression atmosphérique, qui diminue le gradient de pression entre les alvéoles pulmonaires et les capillaires sanguins qui récupèrent l'oxygène. Résultat : à 5000 m d'altitude, 50 % de l'oxygène contenu dans l'air est utilisable.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Paolo Pesce / Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR La Recherche

france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Juste une seconde…

L'histoire que nous vous racontons ce mois-ci se déroule il y a 13,8 milliards d'années. C'est-à-dire il y a $4{,}35 \times 10^{17}$ secondes, ou encore 435 millions de milliards de secondes. Approximativement. Mais une de ces secondes fut particulièrement importante pour l'histoire de l'Univers : la première. Imaginez : durant cette seconde, la taille de l'Univers observable passe de 10^{-35} mètre à plus d'une année-lumière, sa température de 10^{32} °C à 10^{12} °C. Toutes les forces qui régissent la physique se mettent en place. Les quarks apparaissent afin de donner naissance à tous les neutrons et tous les protons. Tout était prêt pour que se forment ensuite les premiers atomes, ceux d'hydrogène et d'hélium. Un phénomène qui, lui, prendra plusieurs minutes *(p. 39)*… Mais quelle extraordinaire force a pu dilater ainsi l'espace-temps à des vitesses bien supérieures à celle de la lumière ? Les théories abondent, les équations pleuvent et les outils de vérification commencent à se dessiner, tel le télescope spatial Litebird qui pourrait être lancé en 2032 *(p. 34)*. Le scénario ne fait certes pas consensus. Car les théoriciens n'arrivent pas à remonter au temps zéro, ils se heurtent à un mur à 10^{-43} seconde *(p. 30)*. Et la question du « Et avant ? » ne peut être évitée. Retour dans le présent. Où une seconde peut paraître une éternité quand on souffre de douleurs chroniques. C'est le cas de 12 millions de Français. Pourtant, notre deuxième grande enquête révèle que ce n'est pas une fatalité. Nous avons identifié six techniques méconnues qui permettent de soulager les patients *(p. 62)*. Au-delà des médicaments, des solutions existent, mises en œuvre dans des centres antidouleur qui ne sont pourtant fréquentés que par 3 % des patients. Depuis Albert Einstein, nous savons que la seconde n'est pas immuable. Nous souhaitons que les secondes vous paraissent toujours courtes à la lecture de votre journal préféré ! ■

> « Une seconde fut particulièrement importante pour l'histoire de l'Univers : la première »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, É.-O. ELJAOUHARI, J. FREY, P. KALDY, A. VERNET, S. VIONNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-21-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés » et un encart « Sophia Boutique - parure collier et bracelet Saphir » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, ainsi qu'un encart « L'Homme Moderne » et une lettre « activation compte Sciences et Avenir-La Recherche » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Avec le soleil, on peut faire fondre sa facture d'électricité.

Avec **ENGIE My Power**, produisez votre propre électricité en installant des panneaux solaires sur votre maison.

Jusqu'à **1500 €** TTC/an* **d'économie sur votre facture d'électricité.**

J'agis avec ENGIE My Power

En savoir plus

ENGIE My Power

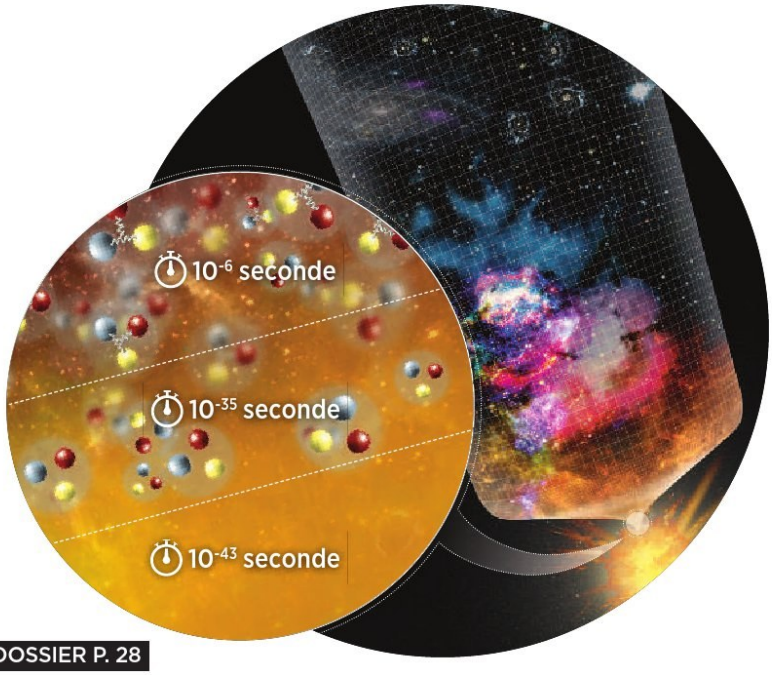
L'énergie est notre avenir, économisons-la !

*Exemple type pour 1500€ d'économie/an en moyenne sur 10 ans: maison située à Nice (06), orientée plein sud, inclinaison du toit 35° par rapport à l'horizontale, logement construit avant 1980, surface de 130m², chauffage et eau chaude sanitaire fonctionnant à l'électricité, climatisation, piscine, composé de quatre personnes et puissance installée de 5,1kWc. Le calcul des économies est réalisé à partir de données de production issues du site PVGis (prenant en compte l'inclinaison et l'orientation du toit), de données de consommation estimées grâce à la date de construction du logement et le nombre d'occupants (références obtenues avec le rapport RAGE 2014, ADEME) et d'un taux d'autoconsommation fixé à 68%. Informations données à titre indicatif, qui peuvent varier en fonction de la situation géographique du logement, des habitudes de consommation du foyer et du contrat d'électricité souscrit. Le montant en euros est calculé en multipliant les kWh autoconsommés (production solaire multipliée par le taux d'autoconsommation) avec un prix du kWh fixé à 0,3094€ pour les dix prochaines années. Ce prix est défini sur base du tarif réglementé Heures Pleines 9kVA applicable au 1er août 2023 sur lequel est appliquée une augmentation de 5% par an sur les dix prochaines années. Ce montant n'inclut pas la revente du surplus sur le réseau électrique ni les aides de l'État.

ENGIE MY POWER, SAS AU CAPITAL DE 9846000€, SIÈGE SOCIAL : 1 PLACE SAMUEL DE CHAMPLAIN 92400 COURBEVOIE, RCS NANTERRE 849 069 554. © Getty Images.

SOMMAIRE

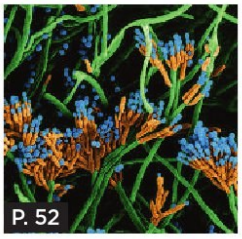
Sciences et Avenir - La Recherche / N° 927 / Mai 2024



DOSSIER P. 28

La première seconde de l'Univers

Pour asseoir définitivement la théorie du Big Bang, les chercheurs sondent ses plus anciennes traces. « Sciences et Avenir » vous relate cet instant dominé par la formidable inflation cosmologique et la formation des premières particules.


P. 52

Les ferments vont révolutionner la nourriture du futur

En consommation croissante, les produits fermentés constituent désormais une sérieuse solution de transition vers une alimentation moins carnée et moins sucrée.

P. 62

Six techniques innovantes pour apaiser la douleur

Jamais la prise en compte de la douleur chronique n'a mobilisé autant de programmes de recherche. Tour d'horizon de ces innovations, du laser à la toxine botulique.

P. 76

Venise : les mystères de la dernière galère

Cette maquette conservée au Musée national de la marine intrigue : est-ce un modèle pour la construction d'un navire ou une œuvre d'art ? Une conservatrice du musée a mené l'enquête.

7 **Éditorial** par Dominique Leglu
8 **Courrier**
9 **Édito** par Mathieu Nowak

ÉVÉNEMENT
12 **Le « Nobel des maths » attribué au Français Michel Talagrand**

SCIENCES FONDAMENTALES
14 **ACTUALITÉS** Des étoiles dévorent leurs planètes / Des éclairs volcaniques sources de vie
42 **Noir : de la couleur à la matière**
47 **Le premier eucaryote de synthèse**
50 **Journal de l'IA : L'IA générative, casse-tête de cybersécurité**

NATURE
16 **ACTUALITÉS** Les géologues disent non à l'anthropocène / À Tahiti, les coraux sacrifiés pour les JO
52 **Ferments : ils vont révolutionner la nourriture du futur**
58 **À la recherche des espèces perdues**

SANTÉ
20 **ACTUALITÉS** Un cerveau humain en très haute résolution / Un patch traduit les mouvements de la gorge en paroles
62 **Six techniques innovantes pour apaiser la douleur**
70 **Ces émulsifiants qui favorisent les maladies**
74 **Nutrition : Les bienfaits de la betterave**

HISTOIRE
24 **ACTUALITÉS** Les plus vieux canoës de Méditerranée / Une forêt fossilisée de 390 millions d'années
76 **Venise : les mystères de la dernière galère**
82 **Les révélations de l'homme de Vittrup**
86 **Histoire des sciences : Léonard de Vinci, anatomiste de génie**

TRANSVERSALES
90 **Sélection livres**
93 **Expositions**
94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni-Gavage / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar
96 **Questions de lecteurs**
97 **Le ciel de mai**
98 **Jeux**

MEHDI BENYEZZAR - DENNIS KUNKEL MICROSCOPY/ SPL/ SUCRÉ SALÉ - AMELIE-BENOIST / IMAGE POINT FR / BSIP - MUSÉE NATIONAL DE LA MARINE/G. DE CARVALHO

Le « Nobel des maths » attribué au Français Michel Talagrand

Le mathématicien a reçu en mars le prix Abel récompensant l'ensemble de ses travaux. Michel Talagrand s'est illustré dans les probabilités, une discipline mal considérée jusqu'à peu par la communauté des chercheurs.

Longtemps, les probabilités sont restées une discipline mal aimée, jugée peu digne des mathématiques « sérieuses » étudiées par ailleurs. Ce n'est plus le cas, comme en témoigne l'attribution, le 20 mars, du prix Abel au Français Michel Talagrand. Soit l'une des deux plus prestigieuses récompenses de la discipline, avec la fameuse médaille Fields réservée aux moins de 40 ans. « *C'était inconcevable il y a encore trente ans,* assure le lauréat de 72 ans. *Désormais, l'introduction du hasard — les processus stochastiques — est un pan immense des mathématiques, et les probabilités sont même le domaine où il y a le plus de conférences* ».

BIO EXPRESS

- **1952 :** Naissance à Béziers (Hérault).
- **1974 :** Entre au CNRS.
- **1995 :** Prix Loève.
- **1997 :** Prix Fermat.
- **2004 :** Élu à l'Académie des sciences (membre correspondant depuis 1997).
- **2019 :** Prix Shaw.
- **2024 :** Prix Abel.

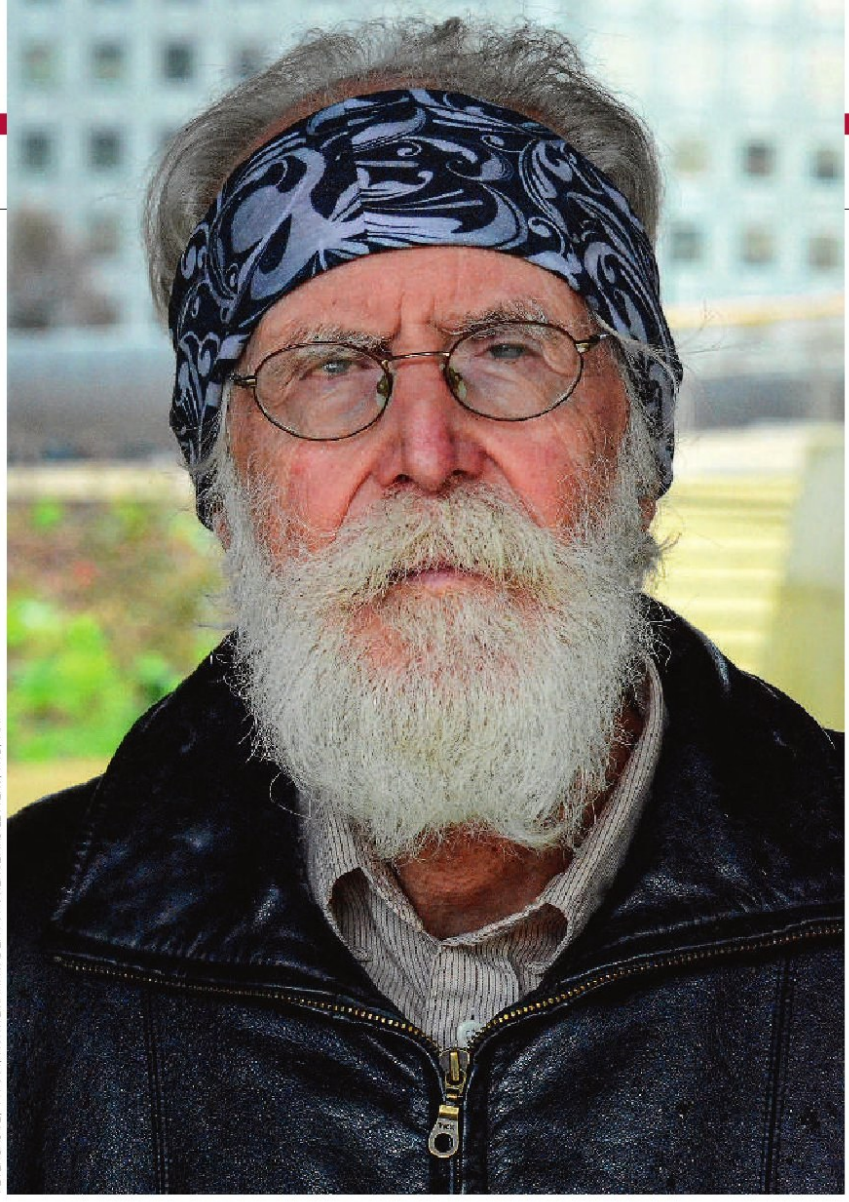
Ce « prix Nobel » des maths récompensant l'œuvre d'une vie n'en fut pas moins une surprise : « *Lorsqu'on me l'a annoncé au téléphone, mon cerveau s'est arrêté cinq secondes. Le vide…* » Difficile pour le probabiliste de se voir aux côtés des précédents lauréats, « *des géants des maths comme Jean-Pierre Serre (2003), Mikhaïl Gromov (2009) ou Jacques Tits (2008).* » Les avis de ses collègues sont pourtant dithyrambiques. « *C'est un visionnaire qui débroussaille des problèmes très profonds et fournit ensuite les outils pour aller plus loin. Son impact en probabilités est immense* », loue ainsi Assaf Naor, professeur à l'université de Princeton (États-Unis).

Une influence scientifique née d'un parcours singulier dans le paysage français des maths. Après avoir perdu la vue d'un œil à l'âge de 5 ans puis été victime d'un décollement de la rétine à 15 ans, « *j'ai vécu plusieurs années dans la terreur de devenir aveugle. Je me suis jeté dans les maths, où je réussissais bien, pour donner un sens à mon existence.* »

La lecture de Sciences et Avenir a joué sur sa vocation

Ses parents le découragent pourtant de suivre une classe préparatoire, qu'ils jugent incompatible avec sa santé, et c'est à l'université de Lyon, proche de chez lui, qu'il fait ses premiers pas. « *Sachez que votre magazine,* Sciences et Avenir, *a eu une grande influence dans mon inclinaison scientifique,* tient-il à préciser. *Mon père mathématicien a eu la bonne idée de m'abonner quand j'avais 7 ans. Bien entendu, à cet âge-là, on ne comprend pas tout, mais les articles d'Albert Ducrocq sur l'astronomie et l'astronautique me passionnaient.* »

En 1974, alors qu'il n'a même pas pensé à présenter le concours pour l'École normale supérieure, voie royale pour les mathématiciens de France, il termine premier à l'agrégation. Embauché au CNRS, il quitte Lyon et atterrit à l'université Paris-VI (aujourd'hui Sorbonne Université), dans le laboratoire d'analyse de Gustave Choquet (1915-2006). Où il subira quelques remarques de ses congénères, qui lui disent en substance qu'être premier à l'agrégation ne suffit pas à faire un bon chercheur… « *Choquet* [également reçu premier à l'agrégation en son temps] *m'avait dit avec un petit sourire : "Vous avez battu les normaliens"* », se souvient-il. « *Choquet l'avait vite repéré,* se remémore son ami Gilles Pisier, professeur émérite à l'université Paris-VI. *Alors que les membres du laboratoire faisaient la queue pour lui présenter leurs travaux, il avait dit*



PETER BADGE / TYPOS1 / NORWEGIAN ACADEMY OF SCIENCE AND LETTERS / NTB / AFP

à Michel : "Oui il y a la queue, mais pas pour vous". » Et c'est donc ici qu'il se révèle. « *Il obtiendra quantité de très beaux résultats sur les probabilités, sur les espaces de Banach — des espaces de dimension infinie —, et sur la théorie de la mesure, qu'il apprécie particulièrement* », précise Assaf Naor.

En 1987, Michel Talagrand s'illustre de façon remarquable sur les fonctions aléatoires : il s'agit de caractériser les processus aléatoires gaussiens, ce qu'il fait à l'aide de mesures majorantes. L'objectif était de déterminer à quel point un processus aléatoire peut devenir grand. Un problème ancien posé dans les années 1940 par le Russe Andreï Kolmogorov et le Français Paul Lévy. « *Les outils du chaînage de Kolmogorov qu'il met en œuvre l'ont ensuite conduit à des résultats significatifs sur des problèmes d'appariement,* commente Assaf Naor. *C'est une caractéristique constante de sa manière de faire : il revient sans cesse sur ses travaux. Non seulement il démontre des résultats profonds, mais il aime aller toujours plus loin et trouver le principe général sous-jacent.* » Dans son œuvre mathématique forte de plus de 300 articles et pas moins de sept livres, il faut aussi mentionner son travail sur la concentration de la mesure, qui culmine en 1995. « *Ce travail a eu un impact phénoménal en informatique théorique et en combinatoire* », estime Assaf Naor. L'idée de la concentration de la mesure est que, pour un objet aléatoire en très grande dimension, la partie aléatoire se concentre dans une toute petite portion de l'espace. « *C'est ce qu'on appelle les inégalités de Talagrand,* reprend Assaf Naor. *Les principes visionnaires qu'il a mis en place ont des applications dans énormément de domaines, en informatique, pour l'étude des algorithmes, en sciences des données, etc.* »

> « Les principes visionnaires qu'il a mis en place ont des applications dans énormément de domaines, en informatique, pour l'étude des algorithmes, en sciences des données, etc. »
>
> **Assaf Naor,** professeur de mathématiques à l'université de Princeton (États-Unis)

Le quantique, son nouveau centre d'intérêt

L'autre point culminant de sa carrière concerne un pan lié à la physique mathématique : les verres de spin, un modèle de physique statistique qui décrit les alliages métalliques. L'Italien Giorgio Parisi, Nobel de physique en 2021, avait trouvé une méthode pour décrire les transitions de phase de ces verres de spin. Mais sa formule n'avait pas de fondement mathématique propre. Michel Talagrand comblera ce manque. « *Une réalisation exceptionnelle* », pour le comité Abel de l'Académie norvégienne des sciences.

À 72 ans, depuis son domicile de Puteaux (Hauts-de-Seine), le lauréat dit qu'il ne fait plus de mathématiques. Quoique… « *Je ne pense pas du tout qu'il soit à la fin de sa carrière. Même si, chaque année, il dit qu'il va arrêter les maths* », sourit Gilles Pisier. « *Au départ, je me suis dit que je m'arrêterai à 40 ans, puis à 50 ans. Et j'ai continué… Mais avec l'âge, si l'expérience augmente, la créativité décroît. Et je pense que j'ai eu ma dernière bonne idée à 52 ans.* » Paru en 2022, son dernier gros livre — près de 800 pages — est une introduction à la théorie quantique des champs pour mathématiciens, un de ses nouveaux centres d'intérêt. Avis aux amateurs ! ■

Philippe Pajot

INTOUCHABLE OPENVERSE

Le phénomène a été détecté grâce à la signature chimique de l'étoile avaleuse (en bas à gauche, vue d'artiste).

Des étoiles dévorent leurs planètes

Au moins une étoile sur douze aurait un jour avalé une planète, selon les données fournies par le satellite Gaia.

C'est une gloutonnerie cosmique d'une ampleur insoupçonnée que vient de mettre en évidence une étude publiée dans *Nature*. Au moins une étoile sur douze aurait un jour avalé une planète, selon une analyse ayant porté sur plus de 90 paires d'étoiles. Des doublons stellaires repérés grâce au satellite Gaia de l'Agence spatiale européenne, composés d'étoiles nées du même nuage moléculaire et possédant donc la même composition chimique.

Une équipe internationale a mis au point une méthode pour déterminer si l'un des deux membres de ces paires d'étoiles avait pu ingérer une planète dans son passé. Le repas stellaire se traduit par des différences dans le spectre de l'étoile, sorte de signature chimique de la planète disparue. Les astronomes ont pu évaluer les données spectrales et en conclure qu'au moins 8 % des étoiles gardaient la trace d'une ingestion planétaire. Ces événements sont probablement plus fréquents lors des 100 premiers millions d'années de vie d'un système stellaire, car il y règne alors une agitation chaotique à même de perturber les orbites des planètes naissantes jusqu'à les projeter vers leur étoile.

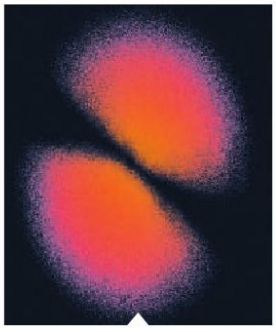
Les superterres seraient les plus vulnérables

Selon les chercheurs, les superterres sont les planètes les plus susceptibles d'être gobées. Ces astres composés de roches, dont la masse est comprise entre 1 et 10 fois celle de la Terre, *« sont plus sensibles aux instabilités qui peuvent survenir sur de longues périodes »*, précise Bertram Bitsch, coauteur de l'étude et chercheur à l'institut Max-Planck d'astronomie à Heidelberg (Allemagne). Si ces superterres sont absentes de notre système solaire, faut-il en conclure que le Soleil lui-même les aurait avalées ? *« Un article prétend en effet qu'il y aurait eu des superterres intérieures poussées dans le Soleil par la migration de Jupiter. Mais cette hypothèse n'a jamais eu beaucoup de succès, car les preuves chondritiques* [liées à l'analyse des météorites] *indiquent que le Système solaire interne n'avait pas assez de matériaux pour la formation de superterres »*, répond Bertram Bitsch. ■ **J. I.**

Une cartographie inédite des trous noirs supermassifs

ASTROPHYSIQUE Grâce au télescope spatial de la mission européenne Gaia, des scientifiques ont pu cartographier, dans le plus grand volume total d'Univers jamais considéré, 1,3 million de quasars, la partie visible des trous noirs supermassifs. Le plus lointain quasar a ainsi été observé alors que l'Univers n'était âgé que de 1,5 milliard d'années… **F. N.**

SOURCE : KATE STOREY-FISHER, UNIVERSITÉ DE NEW YORK, ÉTATS-UNIS.



STOREY-FISHER ET AL.

1,3 million de quasars sont représentés sur cette carte.

15

Le nombre d'astéroïdes actifs identifiés

ASTRONOMIE C'est le résultat de la première moisson d'Active Asteroids, un projet de science participative. 8300 bénévoles ont scruté 430 000 clichés depuis août 2021 pour y repérer des astéroïdes possédant des queues ou des enveloppes de gaz et de poussière, semblables à celles des comètes. L'activité intermittente de ces objets situés essentiellement dans la ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter, les rend difficiles à détecter. **F. N.**

IL A DIT

« *Ce signal a toutes les caractéristiques d'un camion et aucune de celles attendues pour un météore !* »

Benjamin Fernando, sismologue à l'université Johns-Hopkins (États-Unis), après l'analyse d'un signal présenté par le physicien Avi Loeb comme celui d'un objet interstellaire possiblement issu d'une technologie extraterrestre. La trajectoire du signal suivait le tracé d'une route proche du sismomètre.

Des disques de saphir envoyés sur la Lune

ESPACE La Nasa a accordé une charge de 1,4 kg au projet français Sanctuary on the Moon, qui vise à condenser les connaissances scientifiques (physique, biologie, etc.) et la culture de l'humanité sur des disques de saphir. La gravure au laser, en cours dans les laboratoires du CEA de Grenoble, inscrira jusqu'à 7 milliards de pixels sur chacun des 24 disques qui seront déposés sur la Lune. **S. V.**

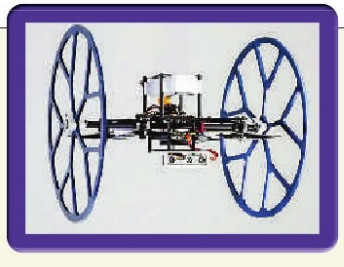
JUSTIN JIN

Séance de dégustation encadrée par les chercheurs afin d'évaluer les critères d'appréciation des breuvages avant leur modélisation.

L'IA se spécialise en bières belges

CHIMIE À partir de la composition chimique de 250 bières du commerce et de leur notation par des experts et des consommateurs, des algorithmes d'apprentissage automatique ont été entraînés à prédire leur goût et identifier quels composés rendaient les bières plus appréciées. Ce qui a permis ensuite d'améliorer le goût d'une bière blonde et d'une autre sans alcool. Les deux ont bénéficié d'une meilleure note que leur version précédente lors de tests gustatifs. **A. D.**

SOURCE : MICHIEL SCHREURS, CENTRE DE MICROBIOLOGIE DE LA KU LEUVEN, BELGIQUE.



FEI GAO/ ZHEJIANG UNIVERSITY

À VOIR SUR LE NET

Un drone aussi à l'aise en l'air que sur terre

TECHNOLOGIE Muni de deux roues latérales et quatre rotors pour la propulsion au sol ou pour le vol, ce drone hybride est capable de s'élever dans les airs pour franchir un obstacle. Il repasse en mode roulant dès que possible, consommant ainsi sept fois moins de batterie. Une caméra et un ordinateur de bord servent à analyser le terrain et calculer la trajectoire. **A. D.**

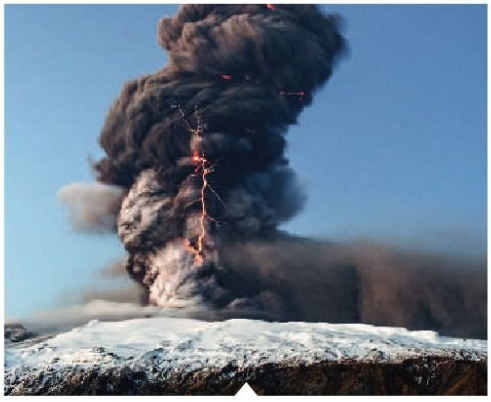
SOURCE : RUIBIN ZHANG, UNIVERSITÉ DU ZHEJIANG, CHINE

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Des éclairs volcaniques sources de vie

Des chercheurs français ont découvert une quantité importante de nitrate dans des dépôts volcaniques.

Les éclairs qui se forment dans les panaches de cendres des éruptions volcaniques pourraient bien avoir fourni des ingrédients essentiels à l'émergence de la vie sur Terre. Telle est la conclusion d'une étude menée par des chercheurs français qui ont découvert une quantité importante de nitrate, une forme oxydée de l'azote assimilable par le vivant, dans des dépôts volcaniques. L'azote est essentiel aux organismes. C'est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, mais sous forme de diazote, une molécule gazeuse qui n'est pas directement utilisable par les organismes vivants. Il faut donc que le diazote soit converti en une forme biologiquement assimilable. Si ce processus est aujourd'hui assuré par les êtres vivants, comment la conversion a-t-elle pu se produire avant l'apparition de la vie sur Terre ? Les scientifiques soupçonnaient depuis longtemps l'action de décharges électriques, notamment par les éclairs volcaniques. Une hypothèse demeurée sans preuve jusqu'à la découverte de cette nouvelle archive géologique. **S. R.**



E. HAARBERG/ NATUREPL/ EBPHOTO

Les décharges électriques lors des éruptions auraient permis de fixer l'azote, générant des molécules organiques.

BURSTON COLE/CANADIAN PRESS/ABC/ANDIA.FR

Le lac Crawford, au Canada, avait été défini comme le point de référence géologique de cette nouvelle ère.

Les géologues disent non à l'anthropocène

Une commission chargée de définir les ères géologiques a rejeté la notion d'anthropocène censée marquer l'impact croissant de l'humain sur la Terre.

Quinze ans de débats scientifiques viennent de s'achever : l'Union internationale des sciences géologiques (IUGS) a annoncé qu'à l'issue d'un vote, les membres de la sous-commission chargée de la stratigraphie de l'ère quaternaire avaient rejeté la notion d'anthropocène (12 voix contre, 4 pour, 3 abstentions, 3 nuls). Officiellement, l'humanité n'est donc pas entrée dans une nouvelle ère géologique et reste dans l'holocène, qui a débuté il y a 11 700 ans. Ce changement devait certifier le fait que l'humain a si profondément modifié l'environnement terrestre, pollué air, eaux et sols et changé le climat qu'il a créé de nouvelles conditions de vie pour la planète entière.

Mais pour marquer le début d'une nouvelle ère, la règle est de définir un endroit dans le monde où les couches géologiques contiennent l'information d'un changement des conditions de vie affectant l'ensemble de la planète ; un point référence appelé « clou d'or ». Celui de l'holocène, adopté en 2008, est situé ainsi au Groenland, où les carottes de glace ont révélé une hausse importante de deutérium, un isotope de l'hydrogène, trahissant un réchauffement global de la planète. Pour l'anthropocène, les géologues de l'IUGS s'étaient accordés en août 2023 sur le lac Crawford, situé dans l'Ontario, au Canada. Dans les dix centimètres de sédiments au fond de cette étendue de 2,4 hectares, se trouvent des traces de combustion d'énergies fossiles, d'engrais chimiques, de plastique et de plutonium provenant de la bombe H, signes de toutes les pollutions humaines.

Le terme garde son usage courant

C'est ce « clou d'or » qui a été rejeté. Si les conditions du vote et son résultat ont été vivement contestés, aucun recours n'est possible. Et, chez les géologues, la question ne pourra pas être reposée avant au moins dix ans. L'IUGS précise toutefois dans un communiqué laconique que le terme « anthropocène » garde sa valeur pour tous ceux dont le travail est de décrire les impacts de l'activité humaine sur l'environnement global de la planète. ■ **L. C.**

Un procédé pour régénérer les batteries à lithium-ion

POLLUTION Des chercheurs japonais des laboratoires Toyota ont publié une méthode pour rétablir les ions de lithium manquants dans une batterie usée. Elle consiste à injecter dans celle-ci un solvant contenant des ions lithium associés à du naphtalène et des électrons. Ce procédé permettrait de donner une seconde vie aux batteries usées au lieu de les détruire pour en récupérer les composants à des fins de recyclage. **P. K.**

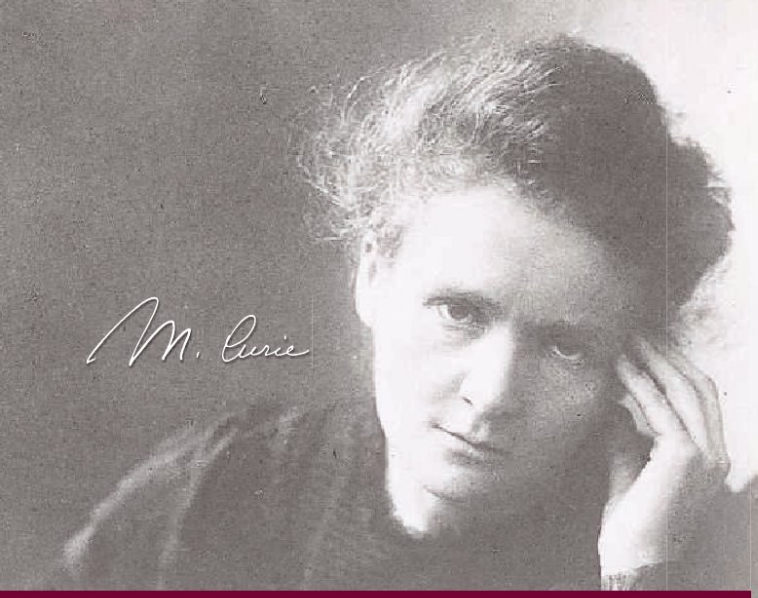
Les grenouilles se font de l'œil

ÉTHOLOGIE Des naturalistes chinois ont pu observer que pour désigner l'élu de son cœur parmi de nombreux prétendants, la petite grenouille *Odorranna tormata* cligne des yeux vers lui. C'est bien le message attendu par le mâle qui se dirige vers la femelle séductrice. Cette tactique de séduction, qui serait apparue en raison du fort bruit ambiant dans les torrents, n'était connue que chez une autre espèce, la nôtre. **P. K.**

SOURCE : PAN CHEN, UNIVERSITÉ NORMALE D'ANHUI, CHINE.

ALBERT FENG

La femelle « Odorranna tormata » cligne des yeux pour signaler au mâle qu'il lui plaît.



Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie
ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

- ☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.
- ☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.
  Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
Code postal : |_|_|_|_|_|
Ville : .....
Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0524

À Tahiti, les coraux sacrifiés pour les JO

La nouvelle tour des juges pour les épreuves de surf a été érigée sur un récif corallien.

DANIEL COLE/AP/SIPA

Les fondations en béton de la tour occupent 322 m² dans le lagon de Teahupo'o, où ont été récensés plus de 1000 coraux.

Des chercheurs des universités d'Hawaii et de l'Arizona (États-Unis) ont évalué l'impact environnemental de la nouvelle tour des juges érigée dans le lagon de Teahupo'o, à Tahiti, pour les épreuves de surf des jeux Olympiques de cet été. Juste avant que la construction polémique ne soit finalisée, ils ont utilisé des techniques de photogrammétrie 3D pour cartographier les habitats de trois sites touchés par le chantier. Dans les 322 m² correspondant au seul emplacement de la tour, ils ont recensé 1003 coraux de 20 espèces différentes, soit des communautés coralliennes prospères, qui contribuent à la fonction écologique de l'ensemble du système récifal. Le dragage du lagon réalisé pour l'acheminement des matériaux par barges aurait eu un impact direct sur 2500 m² du précieux récif. Peu avant la fin des travaux, Cliff Kapono, coauteur de l'étude, rappelait qu'il *« existait des alternatives, comme la tour existante en bois, utilisée par la World Surf League pour ses compétitions »*. ■ **S. R.**

WEST BENGAL FOREST DEPARTMENT

Des éléphants enterrent leurs jeunes défunts

ÉTHOLOGIE Cinq inhumations d'éléphanteaux âgés de 3 mois à 1 an ont pu être observées et décrites dans le nord du Bengale (Inde). Le troupeau d'éléphants d'Asie tirait parti des canaux d'irrigation d'une plantation de thé pour déposer sur le dos les jeunes décédés, avant de les ensevelir. Les canaux étant peu profonds, les pattes ne pouvaient être recouvertes. **A.-S. T.**

SOURCE : PARVEEN KASWAN, INDIAN FOREST SERVICE, INDE.

Les méga-sécheresses menacent l'Australie

CLIMATOLOGIE Des simulations climatologiques montrent que le changement climatique en cours pourrait conduire l'Australie à connaître des épisodes de sécheresse durant plus de vingt ans. Si la courte période d'observation des précipitations australiennes, d'environ 120 ans, rend difficile l'obtention de statistiques robustes, les chercheurs appellent le secteur agricole à se préparer à ces « méga-sécheresses ». **J. F.**

SOURCE : GEORGINA FALSTER, UNIVERSITÉ NATIONALE AUSTRALIENNE.

Une nouvelle espèce d'orchidée de Darwin

MARIE SAVIGNAC

« Solenangis impraedicta » possède un éperon à nectar de 33 cm de long.

BOTANIQUE Découverte à Madagascar, *Solenangis impraedicta* possède un éperon à nectar d'une taille record de 33 centimètres, qui contraste avec ses petites fleurs de 2 cm. Elle est apparentée à l'orchidée de Darwin *(Angraecum sesquipedale)* dont l'éperon de 25 cm avait conduit le célèbre naturaliste à prédire en 1862 qu'il existait un papillon de nuit pourvu d'une trompe de la même longueur susceptible de polliniser la fleur. Hypothèse confirmée 130 ans plus tard. **H. J.**

SOURCE : JOÃO FARMINHÃO, UNIVERSITÉ DE COIMBRA, PORTUGAL.

Le moustique-tigre a fini sa colonisation en France

BIODIVERSITÉ L'agence régionale de santé de Normandie a annoncé que le moustique-tigre *(Aedes albopictus)*, vecteur de la dengue, du chikungunya et du virus Zika, s'était implanté dans le département de la Seine-Maritime. La Normandie était jusqu'alors la dernière région de France métropolitaine dans laquelle le moustique n'était pas installé. La première implantation sur le territoire métropolitain remonte à 2004. **H. J.**

Les voyages du SAVOIR
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

L'art rupestre à livre ouvert

LE SITE ARCHÉOLOGIQUE DE FOZ CÔA au Portugal

Avec Jean-Michel Geneste et Philippe Pajot

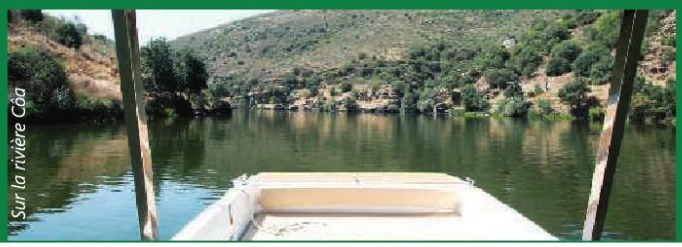
Du 10 au 15 septembre 2024

Le Douro à Vila Nova Foz de Côa

Les sites d'art rupestre préhistorique de la vallée de Côa se trouvent sur les berges escarpées de la rivière Côa, affluent du Douro. Des chasseurs-cueilleurs ont gravé sur des roches des milliers de figures animales durant plusieurs millénaires. C'est à retrouver et décrypter ces gravures que s'emploient des chercheurs archéologues depuis 1996.

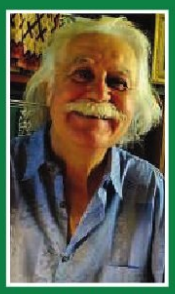
Cada do inferno

En petits groupes, pour une meilleure qualité des visites, nous irons à la découverte de ces gravures millénaires, parfois difficiles à lire mais nos guides nous y aideront. Comprendre, interpréter et comparer ces expressions artistiques sera aussi l'objectif des conférences de Jean-Michel Geneste.



Sur la rivière Côa

Au programme : Visites de Porto, Braga, Guimarães, parc archéologique de Foz Côa, Pinhao, Vila Real. En pension complète.
5 nuits / 6 jours de Porto à Porto 1.950 € par personne en pension complète.



JEAN-MICHEL GENESTE
Archéologue,
Conservateur général
du patrimoine

PHILIPPE PAJOT
Rédacteur en chef
de *La Recherche*

THIERRY AUBRY

Rencontre avec les archéologues **Thierry Aubry** et **Luis Luis** en charge des fouilles et des études sur le site de Foz Côa.

LUIS LUIS

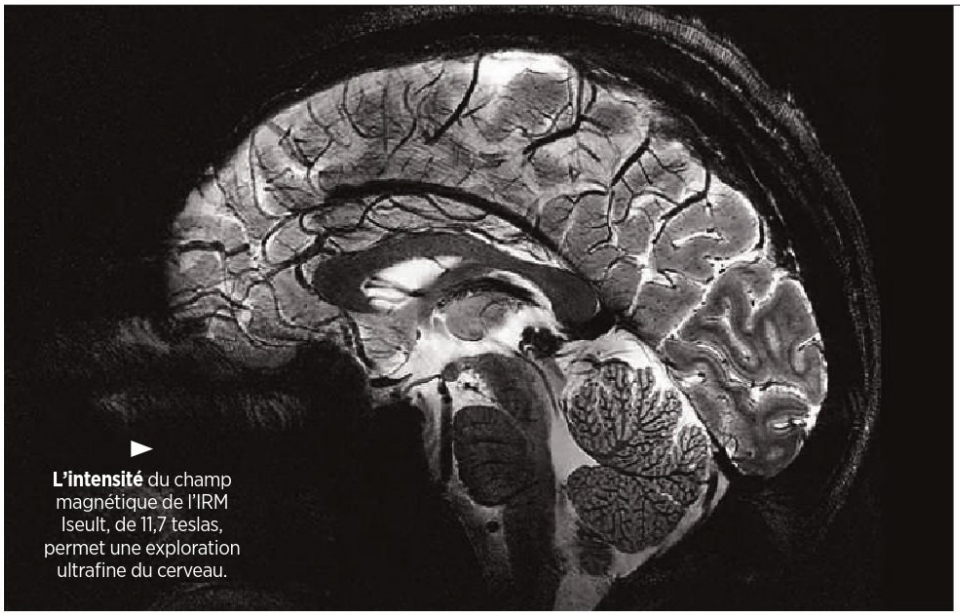
Les sites d'art rupestre préhistorique de la vallée de Côa se trouvent sur les berges escarpées de la rivière Côa, un affluent du Douro. Ils témoignent d'une occupation humaine importante et continue depuis la fin du paléolithique. Les grottes n'ont pas l'apanage de l'art rupestre. Ici, sur des centaines de parois ont été gravées par des humains, hommes, femmes et peut-être enfants, durant plusieurs millénaires, des milliers de figures animales présentant l'ensemble d'art paléolithique en plein air le plus important d'Europe et le plus remarquable de la péninsule Ibérique. Mais pour en savoir plus, pourquoi ? comment ? écoutons Jean-Michel Geneste qui nous accompagnera dans cette découverte, et ses collègues archéologues qui nous accueilleront !

Mais cette région du Haut Douro n'est pas seulement riche en vestiges de la préhistoire. Elle réserve aussi de très belles surprises en matière de paysages, de monuments, d'azulejos de découvertes touristIques, sans parler du vin de Porto qui a là ses vraies racines, comme le fado ! Et c'est une des caractéristiques des *Voyages du Savoir* que d'allier le sérieux de la découverte scientifique aux plaisirs du tourisme culturel !

Organisation technique
BLB TOURISME

PROGRAMME, RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
blb-tourisme.bzh/voyages-du-savoir
Ou scannez

BLB TOURISME Zone de KERBOIS 15, Rue Yves de Kerguelen 56400 AURAY
Tél : 02 97 56 60 86 Courriel : inscription@blb-tourisme.com



L'intensité du champ magnétique de l'IRM Iseult, de 11,7 teslas, permet une exploration ultrafine du cerveau.

CEA

Un cerveau humain en très haute résolution

Le plus puissant IRM au monde, au centre Neurospin de Saclay, fournira des détails inédits sur les connexions neuronales et l'activité du cerveau.

Ce ne sont rien de moins que les images les plus précises du cerveau humain jamais réalisées à ce jour qui ont été dévoilées le 2 avril. Ces clichés, historiques, ont été obtenus par le scanner IRM Iseult, le plus puissant jamais construit, installé au centre de neuro-imagerie Neurospin du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) à Saclay, dans l'Essonne. Plus de vingt ans de travaux et quelque 200 millions d'euros ont été nécessaires pour concevoir cet IRM engendrant un champ magnétique record de 11,7 teslas, bien plus que les IRM de 1,5 ou 3 teslas utilisées dans les hôpitaux. La machine mobilise pour cela des technologies hors norme. En particulier, son gigantesque électroaimant de 130 tonnes mesurant 5 mètres de diamètre pour 5 mètres de long.

Mieux comprendre les processus cognitifs

Les perspectives ouvertes par cette machine unique au monde sont immenses. Cet outil de recherche ouvert aux scientifiques internationaux permettra dans les années à venir de découvrir de nouveaux détails sur les connexions neuronales et l'activité du cerveau, ou encore d'établir de meilleurs diagnostics pour les maladies cérébrales. « *C'est un monde inconnu qui s'ouvre à nous et nous avons hâte de l'explorer* », s'émerveille Nicolas Boulant, directeur de recherche au CEA et responsable du projet Iseult. Les données anatomiques ultrafines caractériseront en particulier certaines régions cérébrales comme les ramifications du cervelet ou la structure du cortex, fine couche plissée qui recouvre les deux hémisphères du cerveau. Et, grâce aux analyses fonctionnelles, Iseult devrait permettre de « *mieux comprendre comment fonctionne le cerveau dans des processus cognitifs tels que la lecture, le langage ou le calcul mental* », annonce Nicolas Boulant. Sans oublier la recherche médicale. La finesse de l'appareil pourra en effet sonder la biochimie du cerveau et cartographier les distributions de lithium, de glucose, de glutamate ou de fer, impliquées dans diverses maladies psychiatriques ou neurodégénératives. ■ **F. D.**

4,25 millions de dollars

Le prix du médicament le plus cher

PHARMACOLOGIE Le Lenmeldy, commercialisé par Orchard Therapeutics, a été approuvé par la FDA, l'agence américaine du médicament. Cette thérapie génique vise à soigner la leucodystrophie métachromatique, une maladie génétique rare touchant une naissance sur 45 000 par an en France. Il détrône le Hemgenix (3,5 millions de dollars), commercialisé par CSL Behring contre l'hémophilie B. **C. L.**

Une montre perce à jour les vaisseaux sanguins

IMAGERIE Une équipe chinoise a mis au point le premier dispositif portable au monde d'imagerie photoacoustique. Miniaturisée sous forme d'une montre, la technologie affiche une image HD des vaisseaux sanguins du poignet. Encore couplé à un sac à dos pesant 7 kg, le système devrait s'alléger et permettre de mieux surveiller la santé cardiaque des patients. **S. R.-M.**

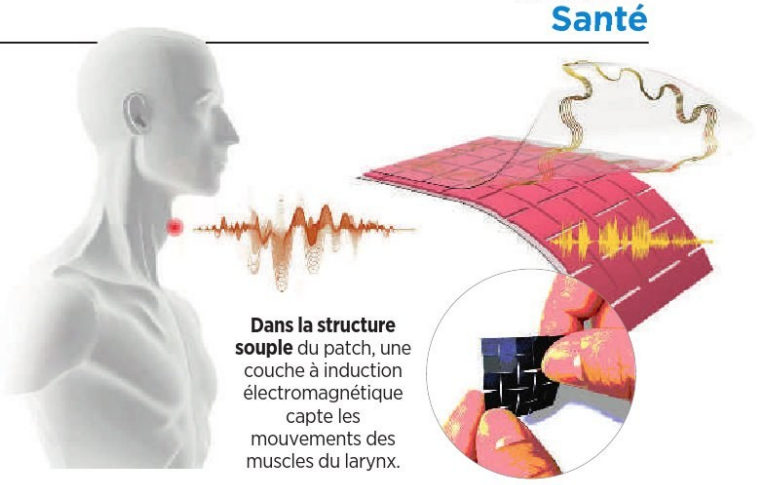
SOURCE : TING ZHANG, SUSTECH, CHINE.

LEI XI, SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

La vascularisation du poignet s'affiche en HD sur le dispositif.

Un patch traduit les mouvements de la gorge en paroles

Ce dispositif commandé par une IA pourrait permettre aux patients atteints d'altération ou d'extinction de la voix de communiquer oralement.



Dans la structure souple du patch, une couche à induction électromagnétique capte les mouvements des muscles du larynx.

JUN CHEN LAB/UCLA

Un nouveau dispositif développé par des chercheurs américains peut décoder la parole sans la contribution des cordes vocales. Collé sur la gorge, il transmet les mouvements des muscles du larynx à un algorithme d'intelligence artificielle. Pour l'instant testée sur cinq phrases, dont « *joyeux Noël* » et « *je t'aime* », cette technologie reconnaît les mots prononcés avec une précision de 95 %. « *Tester l'appareil avec des phrases inconnues serait une tâche d'apprentissage automatique* », anticipe Ziyuan Che, spécialiste des biomatériaux et premier auteur de l'étude parue dans *Nature Communications*. « *Avec suffisamment de données collectées auprès de l'utilisateur, nous pensons qu'il est possible de traduire n'importe quelle phrase prononcée par le patient.* » Se passer des cordes vocales pourrait rendre leur voix aux patients atteints de dysphonie (altération de la voix), ou d'aphonie (extinction de voix) en raison de nodules, du traitement du cancer du larynx ou encore après une trachéotomie. **C. G.**

EN DEUX MOTS

PSYCHIATRIE Le premier test sanguin au monde permettant de différencier la bipolarité de la dépression est commercialisé en France depuis avril. **INFECTIOLOGIE** Les humains transmettent deux fois plus de virus aux autres animaux que l'inverse, selon la première étude quantifiant le phénomène des anthroponoses. **GROSSESSE** Une étude montre que l'adoption, par les femmes enceintes, d'un régime alimentaire pauvre en protéines et riche en graisses, peut altérer l'horloge biologique du nouveau-né.

A. MELLO ET AL./THE LANCET 2024

La prosopométamorphopsie perturbe la perception des visages.

L'homme qui voyait les autres en démons

NEUROPSYCHIATRIE Un Américain de 58 ans s'est réveillé un matin avec une vision déformée des visages, tous lui apparaissant sous une forme « démoniaque ». Ce cas de prosopométamorphopsie, un trouble visuel aux causes neurologiques incertaines, a été investigué par des neuropsychiatres. Ne percevant aucune distorsion sur les images en 2D, le patient a pu aider les médecins à reconstituer la façon précise dont son trouble déformait les visages. **H. J.**

SOURCE : ANTÔNIO MELLO, DARTMOUTH COLLEGE, ÉTATS-UNIS.

Un test simplifié pour les cancers oropharyngés

ONCOLOGIE Un cancer de la bouche ou de la gorge provoqué par l'alcool, le tabac ou un papillomavirus peut être détecté par le dosage d'un peptide antimicrobien produit par les cellules épithéliales, la défensine-bêta 3, montrent des chercheurs de Cleveland (États-Unis). Sensible et fiable, le test sur frottis de la lésion permettrait d'éviter les biopsies et faciliterait l'identification des cancers oraux. **P. K.**

SOURCE : SANTOSH GOSH, UNIVERSITÉ CASE WESTERN RESERVE, ÉTATS-UNIS.

Un nouveau contrôleur naturel de l'appétit

MÉTABOLISME En étudiant de près la façon dont agit la metformine largement prescrite aux diabétiques, une équipe montre que ce médicament augmente la quantité d'un métabolite appelé N-lactoyl-phénylalanine (Lac-Phe) agissant comme un coupe-faim naturel. En tant que facteur impliqué dans la satiété, la molécule pourrait, selon les chercheurs, être une nouvelle cible pour le développement de traitements contre l'obésité. **H. J.**

SOURCE : BARRY SCOTT, TRINITY COLLEGE DUBLIN, IRLANDE.

GARO/PHANIE

L'antidiabétique metformine active un coupe-faim naturel.

L'implant cérébral de Neuralink entre en action

Il permet, par exemple, à une personne paralysée de jouer à un jeu vidéo par la pensée.

Paralysé des quatre membres, un Américain de 29 ans, Noland Arbaugh, est devenu le premier patient équipé de l'implant cérébral fabriqué par Neuralink, la société de neurotechnologie lancée par Elon Musk en 2016. Opéré fin janvier dans le cadre d'un essai clinique, Nolan Arbaugh a été filmé en train de jouer aux échecs et au jeu vidéo Mario Kart en contrôlant les commandes par la pensée. L'implant de la taille d'une pièce de monnaie permet de capter des signaux neuronaux transmis à des algorithmes décodant ses intentions. Rien de révolutionnaire sur le plan scientifique, puisque ce genre de dispositif est testé avec succès depuis plusieurs années. Mais la démonstration de Neuralink laisse entendre que la technologie est mûre pour être commercialisée. Si Elon Musk envisage toutes sortes d'applications farfelues (voir en infrarouge, apprendre des langues en quelques minutes…), ce genre d'implants pourrait bien permettre aux handicapés de retrouver certaines capacités (écrire, s'exprimer ou contrôler un ordinateur). **H. J.**

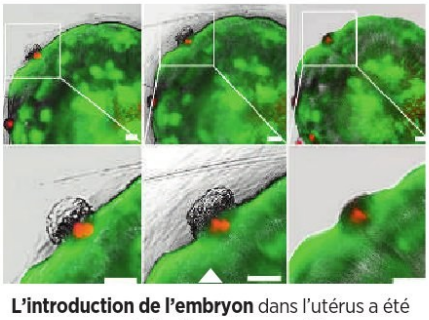
NEURALINK

Un dispositif externe convertit l'activité neuronale captée par l'implant en commandes (ici pour jouer au jeu vidéo Mario Kart).

92 %
La part d'astronautes se plaignant de maux de tête

ESPACE Sur 24 astronautes interrogés, 22 rapportent avoir expérimenté des maux de tête suffisamment importants pour nécessiter une médication, selon une étude. Ces céphalées étaient parfois accompagnées de nausées ou d'hypersensibilité au son ou à la lumière. **C. G.**

SOURCE : ALLA VEIN, UNIVERSITÉ DE LEIDEN, PAYS-BAS.



SHUN SHIBATA ET AL.

L'introduction de l'embryon dans l'utérus a été reproduite dans un organoïde.

Première reconstitution « in vitro » de la nidation humaine

REPRODUCTION Les différentes étapes de l'implantation d'un embryon humain dans l'utérus ont été reproduites et visualisées *in vitro* pour la première fois. Le tissu maternel a été reconstitué de sorte qu'un embryon issu de cellules souches s'y implante avant que se forme une ébauche de placenta. Cette étape a été suivie par l'immersion complète du pseudo-embryon dans la muqueuse qui caractérise la nidation humaine. **P. K.**

SOURCE : SHUN SHIBATA, UNIVERSITÉ DU TOHOKU, JAPON.

Deux Français bénéficient du cœur Carmat

CARDIOLOGIE Le CHU de Montpellier a annoncé avoir implanté le cœur bioartificiel de la société française Carmat à deux patients de 70 et 60 ans en décembre et janvier derniers. La prothèse cardiaque doit leur permettre d'attendre la greffe d'un vrai cœur. Ces opérations interviennent dans le cadre de l'essai clinique Eficas, qui vise à implanter 52 patients dans dix centres agréés en France, avant un possible remboursement du dispositif. **H. J.**

B. GUAY / AFP

L'organe artificiel a été implanté dans l'attente d'une vraie greffe.

Des cellules immunitaires modifiées contre le glioblastome

ONCOLOGIE Premier succès pour cibler un cancer du cerveau, le glioblastome, avec des cellules immunitaires génétiquement modifiées des patients — cellules CAR-T *(lire* S. et A. *n° 824)*. Chez trois patients, la taille des tumeurs a spectaculairement diminué, mais les effets n'ont été, hélas, que transitoires. Une première prometteuse qui reste à décrypter. **S. R-M.**

SOURCE : BRYAN CHOI, ÉCOLE DE MÉDECINE DE HARVARD, ÉTATS-UNIS.

48H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

13-14 SEPTEMBRE 2024

À LA CITÉ DE LA MER,
CHERBOURG-EN-COTENTIN

& EN DIGITAL

Conférences & débats portés par les plus grands spécialistes, animations ludiques & immersives... nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

Cherbourg en Cotentin · leCotentin Communauté d'agglomération · Terre bleue Le Cotentin · Région Normandie · La Manche Le Département

Organisé par

Les Echos Le Parisien Événements · Sciences Avenir La Recherche

GIBAJA ET AL. 2024 PLOS ONE

Cinq pirogues néolithiques ont été excavées d'une zone située sous 8 m d'eau et 3 m de sédiments.

Les plus vieux canoës de Méditerranée

Ces embarcations retrouvées sur les rives d'un lac près de Rome ont été datées entre 5700 et 5100 avant J.-C.

Il y a plus de 7000 ans, des humains naviguaient déjà sur la Méditerranée à l'aide de bateaux relativement sophistiqués. Les restes de ces premières embarcations ont été retrouvés près du village lacustre de La Marmotta, sur les rives du lac de Bracciano, à quelques dizaines de kilomètres de Rome. Aujourd'hui engloutie, la zone archéologique est située à 300 mètres de la rive, enfouie sous 8 mètres d'eau et 3 mètres de sédiments. Accolés à de petites habitations sur pilotis, gisaient cinq canoës qui ont été remontés à la surface. Datés entre 5700 et 5100 avant J.-C., ce sont les plus anciens connus en Méditerranée. L'analyse révèle qu'ils ont été élaborés à partir de quatre essences d'arbres différentes dont les troncs ont été évidés par brûlage. Le canoë le plus grand mesure 11 mètres de long et est équipé de renforts transversaux. Au cours des fouilles, les archéologues ont également déniché trois pièces en forme de T qui servaient probablement à attacher des cordes reliées à des voiles ou à d'autres éléments nautiques.

Une navigation fluviale et maritime

Ces longues embarcations sont étonnamment modernes pour une industrie du néolithique. *« Elles servaient probablement au transport de personnes et de marchandises sur le fleuve Arrone, qui reliait le lac à la mer »*, explique Juan Gibaja, de l'Institut Milà i Fontanals (Conseil supérieur de la recherche scientifique) à Barcelone, en Espagne. Soit un périple de quelque 38 kilomètres pour atteindre la Méditerranée. *« Et ces canoës ont également servi à naviguer en pleine mer »*, souligne le chercheur. En effet, un programme d'archéologie expérimentale, s'appuyant sur la reproduction d'un canoë, a prouvé qu'en longeant les côtes, une telle embarcation pouvait relier sans encombre l'Italie au Portugal. Or, à La Marmotta, ont été découverts de nombreux instruments fabriqués en obsidienne, une roche volcanique trouvée sur les îles italiennes de Lipari et Palmarola. Preuve que ces premiers marins ont bourlingué jusque-là pour récupérer cette précieuse ressource. ■

J. I.

IL A DIT

« Il ne faut pas s'inquiéter. Les pyramides de Gizeh sont en sécurité, et personne ne touchera la pyramide de Mykérinos »

Zahi Hawass, archéologue et ancien ministre des Antiquités égyptien, annonçant que le comité d'examen de la pyramide de Mykérinos, qu'il dirige, s'était prononcé à l'unanimité contre le projet polémique de restauration des blocs de granit qui recouvraient à l'origine la base de celle-ci *(lire* S. et A. *n° 925, p. 23)*.

Quand les oiseaux ont perdu leurs dents

PALÉONTOLOGIE

Une équipe internationale vient d'identifier le plus ancien spécimen d'oiseau dépourvu de dentition grâce à l'analyse d'un fossile découvert dans le nord-est de la Chine. Il appartient à une espèce encore jamais décrite, baptisée *Imparavis attenboroughi*, qui vivait il y a 120 millions d'années. Datée jusqu'ici à -72 millions d'années environ, la disparition des dents aurait eu lieu chez certains volatiles au moins 48 millions d'années plus tôt. **J. I.**

SOURCE : XIAOLI WANG, UNIVERSITÉ DE LINYI, CHINE.

VILLE SINKKONEN

« Imparavis attenboroughi » vivait il y a 120 millions d'années (reconstitution).

ASSISTANCE RETRAITE

Graphiste : Sarah Sicsic Designer

BIEN CHOISIR UNE MAISON DE RETRAITE

Le défi éthique des générations

01.82.52.31.08
07 56 90 30 09
Réponse immédiate

100% Aidant

100% Disponible

100% Satisfait

Allô, Assistance Retraite !

- Une équipe d'experts **«passionnés et consciencieux»** à votre écoute tous les jours, de 8h à 19h.
- Un accompagnement sur mesure **«même en cas d'urgence»**.
- Une connaissance parfaite des maisons de retraite **«de l'intérieur»**.
- Un rendez-vous interactif pour vous aider **«à définir et à exprimer»** vos préférences et vos besoins.
- Une réponse dans l'heure avec **«un vrai choix»** de résidences strictement adaptées.
- Un soutien dans vos démarches **«aussi longtemps que vous le souhaitez»**.

laure@assistance-retraite.net
www.assistance-retraite.net

ASSISTANCE RETRAITE

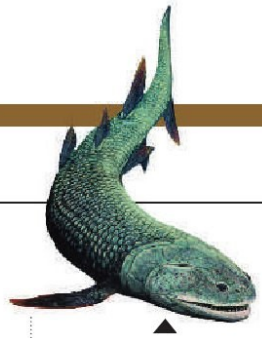
Le labour existait il y a 7000 ans en Europe

Ce sont les plus anciennes marques de charrue tirée par des animaux en Suisse.

Une équipe franco-suisse annonce avoir découvert les plus anciennes marques de charrue tirée par des animaux en Europe. Ces traces de labour identifiées sur le site des Anciens Arsenaux, dans la ville de Sion (Suisse), remonteraient entre la fin du VI^e^ et le début du V^e^ millénaire (entre -5100 et -4700 ans) avant notre ère, selon leur datation au radiocarbone. Elles suggèrent pour la première fois que la traction animale aurait été employée dans le cadre agricole dès le début du néolithique européen. Jusqu'ici en effet, les plus anciennes traces remontaient à la première moitié du IV^e^ millénaire avant notre ère dans le nord de l'Allemagne et au Danemark. Entre autres indices, les scientifiques rapportent la découverte de *« sillons parallèles remplis de sable et de gravier s'étendant sur une surface d'environ 30 mètres carrés, ainsi que des empreintes de sabots laissés par des bovins et des caprins domestiques. »* Une prouesse archéologique tant l'identification de ces sillons vieux de 7000 ans fut complexe. ■ **S. de L.**

AFP

La traction animale remonterait au début du néolithique européen.



BRIAN CHOO, FLINDERS UNIVERSITY

Ce poisson a testé la respiration aérienne il y a 380 millions d'années.

Un pionnier de la sortie des eaux

PALÉONTOLOGIE Un fossile trouvé en Australie serait l'un des premiers vertébrés à s'être aventuré hors des eaux à la découverte de la terre ferme. Cet ancêtre des tétrapodes, *Harajicadectes zhumini*, était un poisson qui expérimentait la respiration aérienne il y a 380 millions d'années : il possédait deux ouvertures au sommet du crâne : des spiracles lui permettant de respirer. **J. I.**

SOURCE : BRIAN CHOO, UNIVERSITÉ FLINDERS, AUSTRALIE.

IN TERRA VERITAS

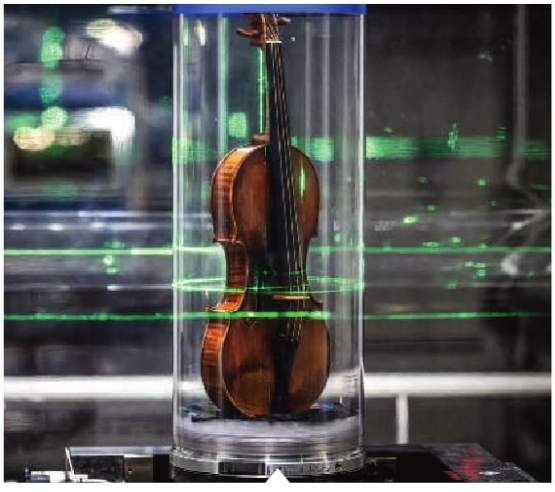
Un charnier de pestiférés exhumé en Allemagne

ARCHÉOLOGIE La ville de Nuremberg, en Allemagne, a annoncé que des fouilles préventives ont révélé l'existence d'un cimetière de victimes d'une épidémie de peste bubonique ayant frappé la ville au XVII^e^ siècle. Les archéologues, qui mettent progressivement au jour les corps inhumés dans huit vastes fosses communes, sont stupéfaits par la quantité de squelettes entassés parfois sur plus d'une dizaine de couches. Au moins un millier de victimes y auraient été enterrées, sur les 15 000 personnes mortes entre 1632 et 1633. **S. de L.**

8600 ans

La datation d'un pain fermenté

ARCHÉOLOGIE Les restes d'une pâte levée ont été identifiés lors de l'excavation d'une structure de four sur le site historique de Çatal Höyük, en Turquie, ont révélé des archéologues de l'université Anadolu. L'examen microscopique de la pièce de forme ronde et d'aspect carbonisé a révélé la présence de fragments broyés et écrasés d'orge, de blé et de pois. **M. B.**



JEAN-PHILIPPE KSIAZEK / AFP

« Il Cannone » est passé début mars sous le faisceau de lumière du synchrotron européen de Grenoble.

Le violon de Paganini passe aux rayons X

LUTHERIE Surnommé « Il Cannone » (Le Canon) pour sa sonorité puissante, le violon préféré du célèbre compositeur italien Niccolò Paganini (1782-1840), fabriqué par Guarneri del Gesù en 1743, a été scanné au synchrotron de Grenoble. L'imagerie par microtomographie à rayons X a permis d'obtenir une image 3D du précieux instrument à l'échelle de la structure cellulaire du bois. Objectif : évaluer le plus finement possible l'état de conservation et comprendre ce qui en fait un instrument exceptionnel. L'examen détaillé des images micrométriques prendra des mois aux scientifiques. **H. J.**

GRAHAM POULTER

Âgé de 1000 ans, ce cerveau présente encore intacts ses plis neuraux.

Des milliers de cerveaux anciens à analyser

ANTHROPOLOGIE Quelque 4400 cerveaux provenant de plus de 200 sites sont en attente d'analyse dans le monde, d'après une vaste revue de la littérature scientifique. Les plus anciens datent d'il y a 12 000 ans, et la plupart ont été remarquablement conservés, notent les scientifiques. En y recherchant la trace de marqueurs chimiques, ils veulent étudier le vieillissement et les troubles neurodégénératifs des anciens humains. **J. I.**

SOURCE : ALEXANDRA MORTON-HAYWARD, UNIVERSITÉ D'OXFORD, ROYAUME-UNI.

IL A DIT

« C'est un défi pour les araignées d'accomplir cette transformation en fourmis »

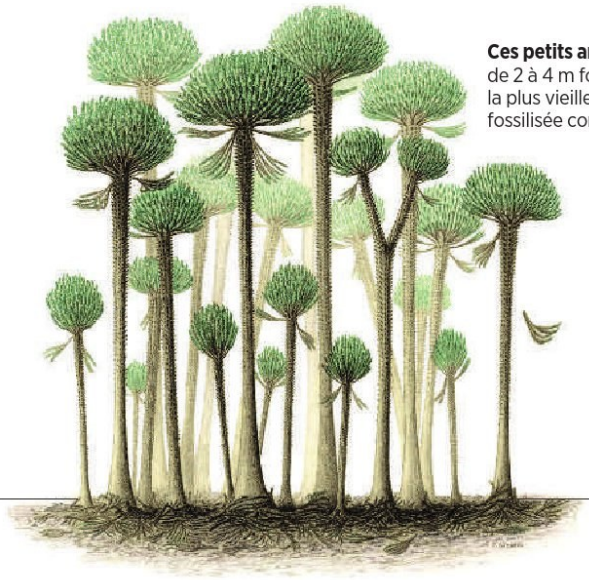
George Poinar Jr, entomologiste à l'université d'État de l'Oregon (États-Unis), a montré comment une espèce ancienne d'araignée, retrouvée dans de la résine fossilisée en Colombie, parvenait à se faire passer pour un insecte en utilisant l'une de ses paires de pattes en guise d'antennes.

Une forêt fossilisée de 390 millions d'années

PALÉOBOTANIQUE Dans le sud-ouest de l'Angleterre, des chercheurs britanniques ont trouvé ce qui est désormais considéré comme la plus vieille forêt fossilisée connue à ce jour. Du genre *Calamophyton*, ces petits arbres de deux à quatre mètres poussaient il y a 390 millions d'années. Ils avaient un tronc fin et creux tandis que leurs branches, regroupées en hauteur, ne possédaient pas de feuilles mais des sortes de brindilles. **A.-S. T.**

SOURCE : NEIL DAVIES, UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.

PETER GIESEN/CHRIS BERRY



Ces petits arbres de 2 à 4 m forment la plus vieille forêt fossilisée connue.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

SPORT

Les maths pour doper la course

Un modèle mathématique met en évidence les meilleures conditions physiologiques et mentales pour une bonne performance à la course à pied. Si elles peuvent améliorer la réussite des athlètes, elles restent à adapter aux entraînements déjà éprouvants des sportifs de haut niveau. À lire sur le site de *La Recherche :*
https://bit.ly/3J4VYT1

CULTURE

Sciences et critiques

Livres, films, séries à la mode… Retrouvez toutes les critiques et les éditos de nos journalistes sur le site de *Sciences et Avenir*.
sciav.fr/927critiq

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

Les tricératops pouvaient vivre en troupeau

La découverte au même endroit de 1200 ossements appartenant à cinq tricératops atteste d'un possible comportement grégaire chez cette espèce.
sciav.fr/927tri

5 minutes

Un jeu vidéo contre la dyslexie

Une start-up vient de lancer Poppins, un jeu vidéo thérapeutique pour accompagner les enfants dyslexiques dans leur apprentissage.
sciav.fr/927dys

10 minutes

La rotation de la Terre ralentit

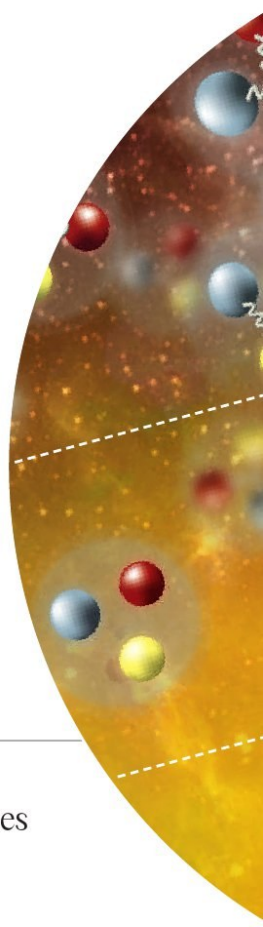
Une étude affirme que la fonte accélérée des glaces, liée au réchauffement climatique, a modifié la vitesse de rotation de notre planète. Explications.
sciav.fr/927terre

SIPA - ART BUS - POPPINS - AFP

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

La PREMIÈRE SECONDE de l'Univers

Pour asseoir définitivement la théorie du Big Bang, le modèle qui décrit l'évolution de l'Univers au cours du temps, les chercheurs sondent ses plus anciennes traces. Un instant dominé par la formidable inflation cosmologique et la formation des premières particules.



Dossier réalisé par
Fabrice Nicot et
Évrard-Ouicem Eljaouhari

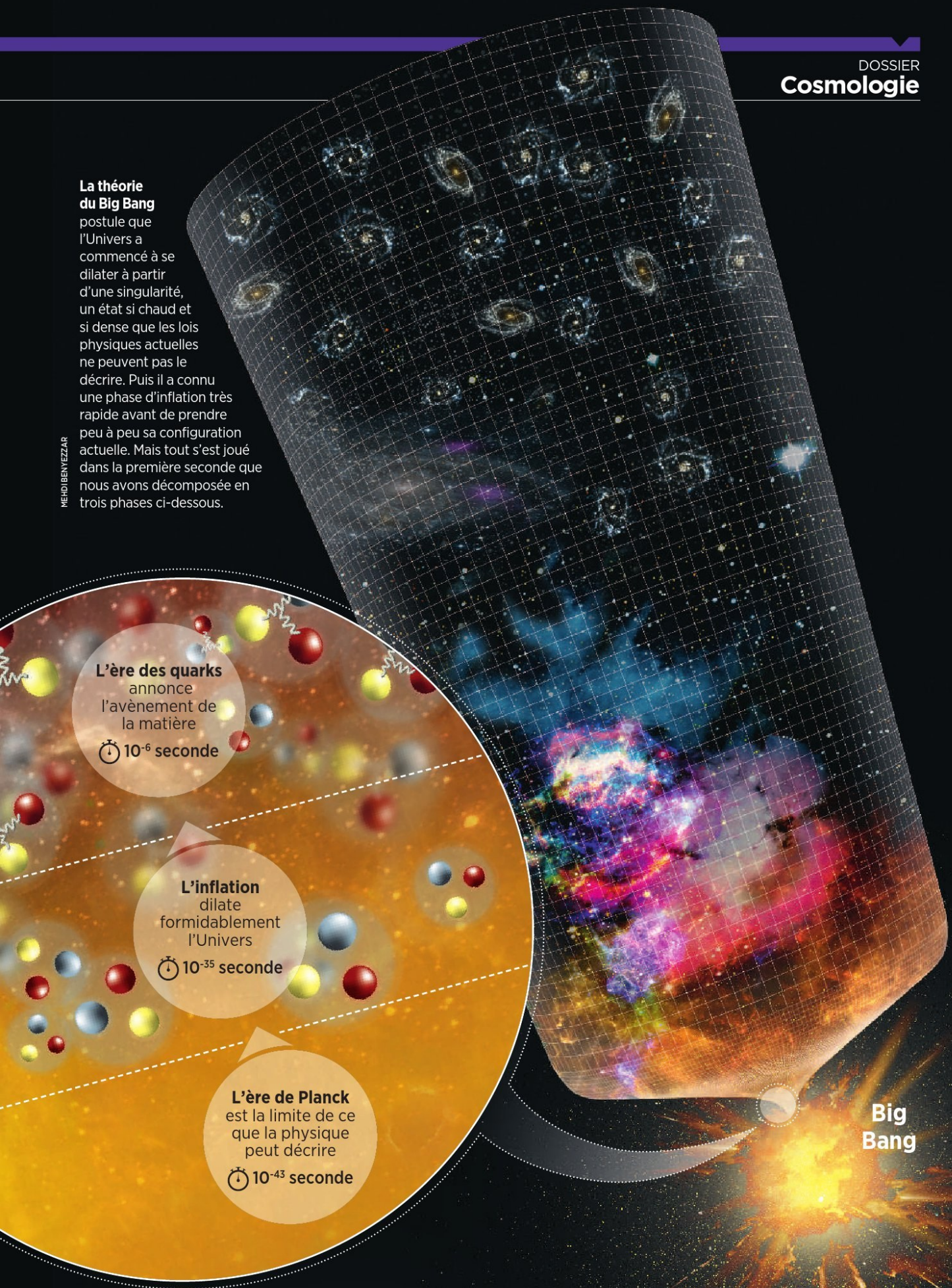
10^{-43} seconde
Le temps zéro de l'Univers
p. 30

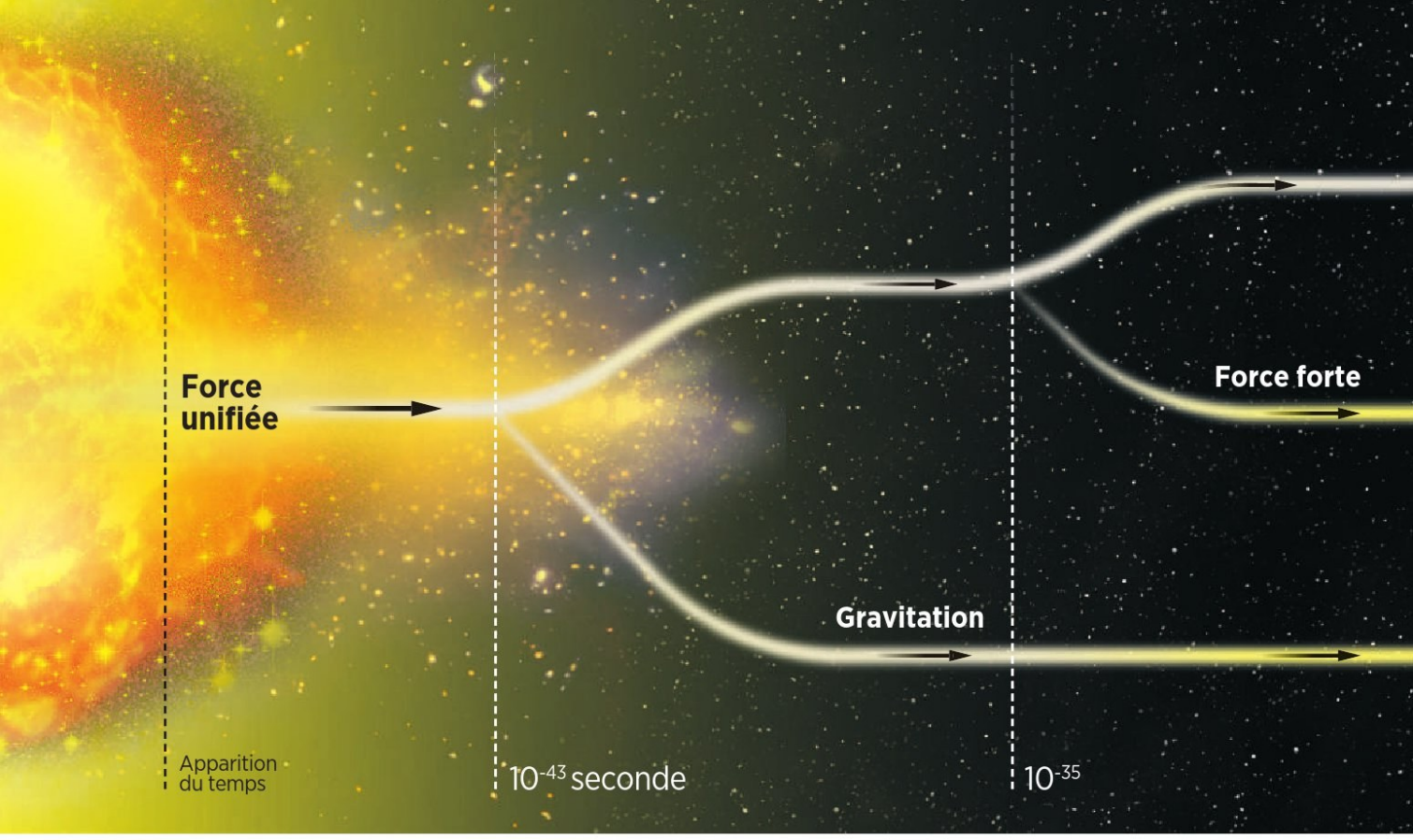
10^{-35} seconde
L'inflation cosmique impose sa loi
p. 34

10^{-6} seconde
La naissance des particules
p. 39

La théorie du Big Bang postule que l'Univers a commencé à se dilater à partir d'une singularité, un état si chaud et si dense que les lois physiques actuelles ne peuvent pas le décrire. Puis il a connu une phase d'inflation très rapide avant de prendre peu à peu sa configuration actuelle. Mais tout s'est joué dans la première seconde que nous avons décomposée en trois phases ci-dessous.

MEHDI BENYEZZAR





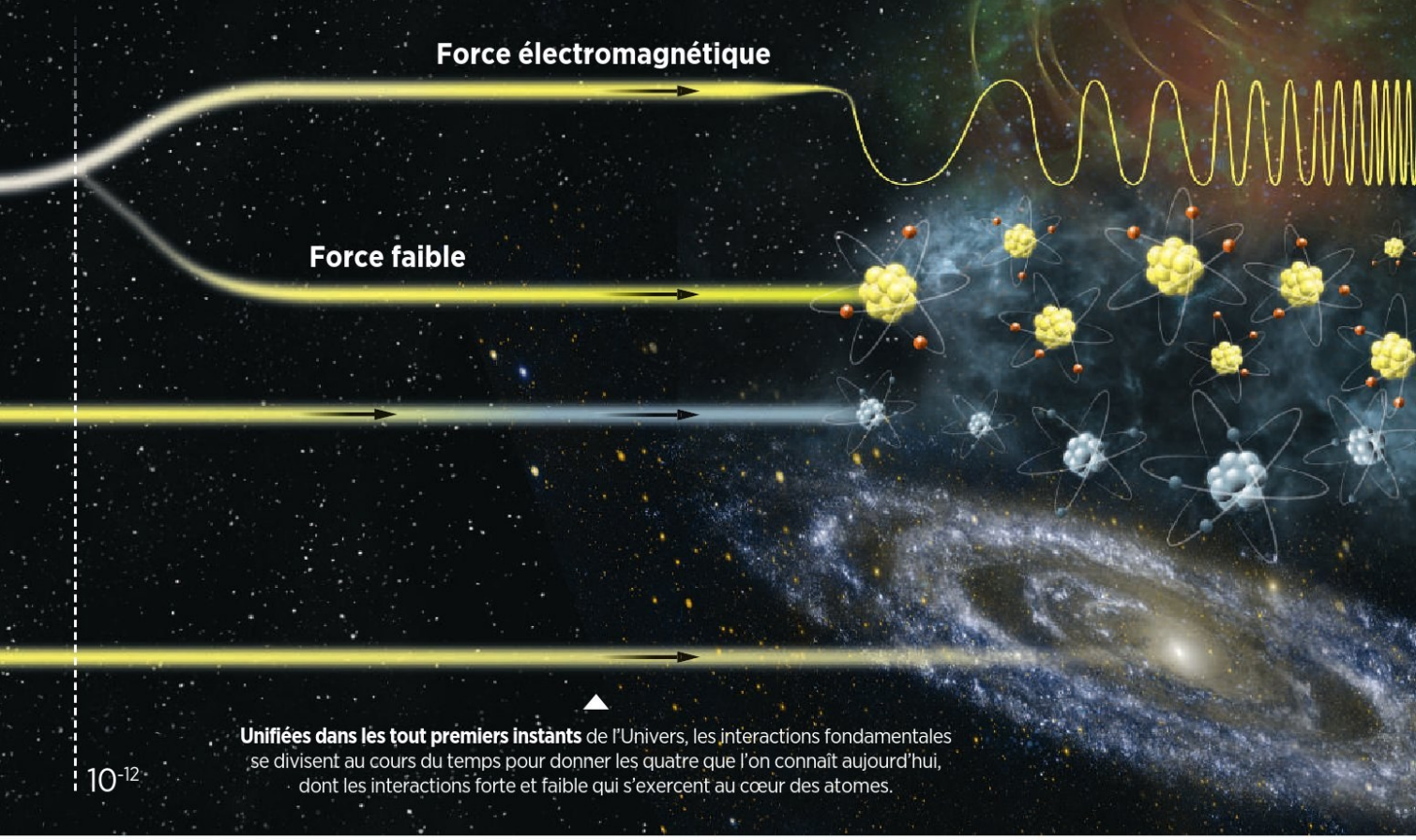
10-43 seconde

Le temps zéro de l'Univers

L'origine exacte de l'Univers nous est masquée par le mur de Planck, au-delà duquel aucune théorie physique ne peut dire à quoi ressemblait le cosmos. Néanmoins, les chercheurs parviennent à s'en approcher de très près.

L'Univers nous échappe. Pas seulement par sa complexité, mais aussi parce qu'il est en fuite : à chaque instant il s'étend davantage. S'il est ainsi en expansion, une question se pose : que se passe-t-il si l'on rembobine son histoire ? S'il se dilate aujourd'hui, alors, par le passé, il a dû être moins étendu. Et, par conséquent, plus dense et plus chaud. C'est l'idée derrière la théorie du Big Bang, le modèle cosmologique qui tente de décrire l'évolution de l'Univers au cours du temps.

Si l'on veut regarder loin dans son passé, il faut regarder loin dans l'espace, puisque la lumière met du temps à nous parvenir. Les télescopes spatiaux comme le James-Webb font des prouesses, mais les galaxies les plus lointaines qu'ils observent se sont formées lorsque l'Univers avait déjà quelques centaines de millions d'années. Le fond diffus cosmologique (CMB), qui correspond au rayonnement émis lorsque les premiers photons ont été libres de se mouvoir, lui, nous montre l'Univers tel qu'il était à 380 000 ans. Mais l'astronomie traditionnelle ne nous mènera pas plus loin. Pour repousser les frontières du visible et du temps, il faut se tourner vers la théorie. Et faire parler les équations pour sonder les premiers instants de l'Univers, il y a 13,8 milliards d'années, un âge estimé grâce à des données du CMB récoltées, entre autres, par les télescopes spatiaux Planck et WMAP. La théorie a permis de découvrir la nucléosynthèse primordiale. *« C'est un processus durant lequel ont été forgés les noyaux d'hydrogène et d'hélium,* rappelle Marc Lachièze-Rey, cosmologiste à l'université Paris Cité. *Il s'est produit après seulement trois minutes. La quantité de ces noyaux a donc d'abord été prédite par le calcul, sur la base de la théorie du Big bang.* » Par la suite, ces prédictions ont pu être testées observationnellement : *« Et les deux coïncident !,*



Unifiées dans les tout premiers instants de l'Univers, les interactions fondamentales se divisent au cours du temps pour donner les quatre que l'on connaît aujourd'hui, dont les interactions forte et faible qui s'exercent au cœur des atomes.

MEHDI BENYEZZAR

applaudit Yves Sirois, physicien au laboratoire Leprince-Ringuet, à Paris. *C'est une démonstration merveilleuse du modèle du Big Bang.* »

Forts de ce succès, confiants en la théorie du Big Bang et en la capacité de leurs équations à faire des prédictions, les scientifiques ont alors décidé d'appliquer la même recette pour s'aventurer au plus près de la première seconde de l'histoire de l'Univers, jusqu'à finalement… se heurter à un mur ! « *Un mur conceptuel* », sourit Patrick Peter, astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris. Érigé alors que l'Univers n'avait que 10^{-43} à 10^{-44} seconde, ce mur dit mur de Planck — en hommage à Max Planck (1858-1947), père de la théorie quantique — marque la limite au-delà de laquelle nos théories physiques ne nous sont plus d'aucune aide. Pour le comprendre, rappelons qu'à mesure que l'on remonte dans le passé, l'Univers est plus dense et plus chaud. Au niveau du mur de Planck, sa taille est de l'ordre de 10^{-35} mètre, son énergie est d'environ 10^{19} gigaélectronvolts (GeV) et sa température de l'ordre de 10^{32} °C. L'énergie de Planck est ainsi 1 million de milliards de fois plus élevée que l'énergie maximale que peut atteindre le LHC, l'accélérateur de particules du Cern à Genève, à ce jour le plus puissant du monde ; et la température de Planck est 100 000 milliards de milliards de milliards de fois supérieure à la température actuelle de l'Univers, qui n'est que de -270 °C… Aucune théorie physique ne peut décrire la matière et l'énergie sous ces conditions infernales.

« *Ce temps de Planck marque en quelque sorte le "temps zéro" de l'Univers* », précise Yves Sirois. Ce qui ne veut pas dire que l'Univers, sous une forme ou une autre, ne préexistait pas au temps de Planck. Mais puisque le temps de Planck est la plus petite échelle de temps imaginable, « *parler de temps plus petit n'a pas vraiment de sens,* poursuit le chercheur. *Des gens comme Stephen Hawking* [1942-2018] *disent même qu'en s'approchant du temps de Planck, le temps disparaît pour devenir une coordonnée d'espace [lire notre dossier « L'origine du temps »,* S. et A. n° 920]. » Contrairement à une idée tenace et longtemps admise, l'Univers n'a donc pas de début, de temps initial. Et la théorie du Big Bang ne dit pas non plus qu'en remontant le temps, tout l'Univers était concentré en un point de densité et de températures infinies, duquel tout serait parti.

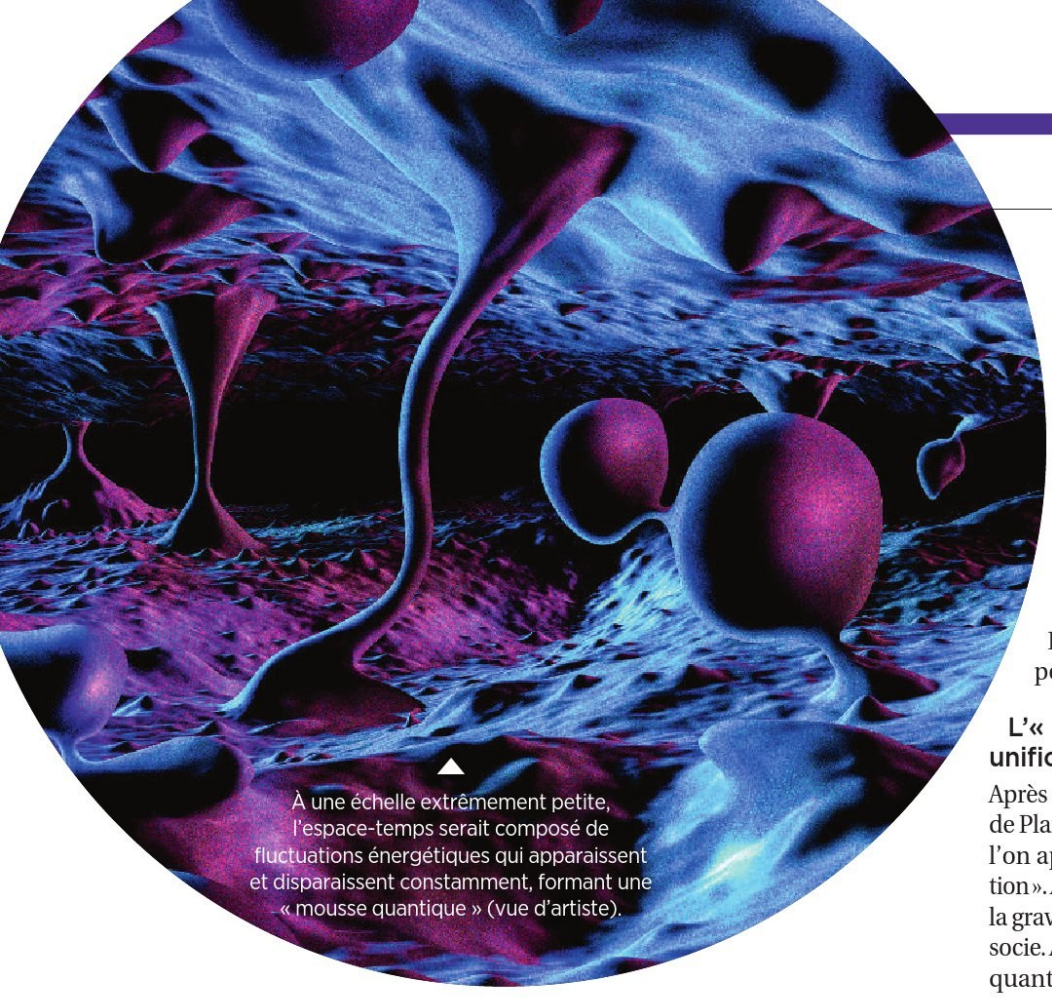
PATRICK PETER

« Pour parvenir à briser le mur de Planck, on pense qu'il faudrait aboutir à une théorie de la gravitation quantique »

Patrick Peter, directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris

Des tentatives d'incursion hardies

Peut-on espérer, un jour, briser le mur de Planck ? « *Pour y parvenir, on pense qu'il faudrait aboutir à une théorie de la gravitation quantique* », rapporte Patrick Peter. À ce jour, deux grandes théories permettent de décrire le vaste terrain de jeu sur lequel s'applique la physique. D'un côté, il y a la relativité générale, une



À une échelle extrêmement petite, l'espace-temps serait composé de fluctuations énergétiques qui apparaissent et disparaissent constamment, formant une « mousse quantique » (vue d'artiste).

M. GARLICK/SPL/SUCRE SALÉ

théorie de la gravitation qui s'attelle à décrire le monde de l'infiniment grand. De l'autre, la théorie quantique qui, elle, sonde ce qu'il se passe au plus profond de la matière, dans le monde des particules. Et si ces deux théories prises séparément ont été vérifiées avec un grand degré de précision, les fusionner en une seule et grande théorie de la gravitation quantique, où toutes les forces seraient unifiées, rencontre bien moins de succès. « *C'est essentiellement lié au fait que la théorie quantique est une théorie qui est "dans" l'espace-temps, tandis que la relativité générale est une théorie "de" l'espace-temps,* expose Patrick Peter. *Ainsi, une théorie de la gravitation quantique appelle à ce que l'espace-temps lui-même soit quantifié. Et on n'a pas de cadre théorique pour ça.* »

Et ce, même à nos échelles. « *On ne connaît pas l'influence gravitationnelle d'un simple électron en laboratoire,* dévoile Marc Lachièze-Rey. *Car la théorie quantique nous dit qu'un électron est décrit par une fonction d'onde non locale, et qu'ainsi sa présence est à la fois ici, là-bas, et peut-être dans tout l'espace-temps.* » Auquel cas, où l'électron peut-il bien exercer son influence gravitationnelle ? Dans tout l'Univers ? En plusieurs endroits de celui-ci ? Ou seulement en un seul ? « *Même ça, on ne le sait pas,* admet le physicien. *C'est pourtant la question la plus simple que l'on puisse se poser, car dans un laboratoire, la gravité est très faible. Alors, avant le mur de Planck, où elle est incommensurablement plus forte, c'est impensable.* » Pas de quoi empêcher quelques physiciens d'entreprendre des tentatives d'incursion à travers ce mur. Parmi les plus hardies théories qui s'efforcent de réconcilier gravitation et quantique, on peut citer la théorie des cordes et la gravitation quantique à boucles. « *Mais aucune n'est réellement satisfaisante* », convient Patrick Peter. Percer le mur de Planck est pour l'heure hors de notre portée.

L'« ère de grande unification »

Après 10^{-43} seconde, on quitte donc l'ère de Planck, et on s'aventure dans ce que l'on appelle l'« ère de grande unification ». À l'amorce de cette nouvelle phase, la gravitation prend son envol et se dissocie. Ainsi, une théorie de la gravitation quantique n'est plus nécessaire pour décrire l'Univers. Les conditions qui y règnent n'en restent pas moins dantesques. Dans un tel environnement, on pense que le cosmos aurait pu être régi par deux forces : la gravitation, donc, et une force unifiant les trois autres interactions fondamentales, les interactions forte, faible et électromagnétique (d'où le nom d'ère de grande unification). « *C'est une idée qu'Einstein avait déjà* », rappelle Marc Lachièze-Rey. S'il n'est pas certain que la grande unification ait bien eu lieu, « *il y a de bons arguments en faveur de son existence* », pose Patrick Peter.

Déjà, la « puissance » des interactions forte, faible et électromagnétique évolue avec l'énergie, et toutes semblent converger lorsque l'on atteint des énergies comme celles qui existaient à cette époque. « *Aussi, on a déjà réalisé l'unification de certaines forces,* rappelle Julien Baglio, physicien théoricien anciennement rattaché au Cern. *D'abord au XIXe siècle, avec l'unification des forces électrique et magnétique en une force électromagnétique. Puis, au cours du XXIe siècle, on a partiellement unifié les interactions faible et électromagnétique en une force dite électrofaible.* »

2023 AMANDA JOY PHOTOGRAPHY

« Il existerait donc comme un superespace, une extension de l'espace-temps ordinaire »

Julien Baglio, physicien théoricien anciennement rattaché au Cern, à Genève (Suisse)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE - JÉRÉMY BARANDE/ WIKICOMMONS

ENTRETIEN

YVES SIROIS
PHYSICIEN AU LABORATOIRE LEPRINCE-RINGUET, À PARIS

« Au LHC, nous explorons l'Univers 10^{-12} seconde après sa naissance »

Le LHC, l'accélérateur de particules du Cern, à Genève, permet-il de remonter jusqu'au début de l'histoire de l'Univers ?
Non. Le LHC permet d'étudier la physique dans les conditions qu'avait l'Univers 10^{-12} seconde après sa naissance. Cet instant de 10^{-12} seconde est toutefois critique dans l'histoire de l'Univers, car il correspond au moment où sont apparues la matière et les interactions. Il est aujourd'hui mieux compris grâce au LHC avec notamment la découverte du boson de Higgs qu'il a permise. Le LHC a également pu démontrer que les particules de matière, les fermions, acquièrent leur masse en interagissant avec ce champ de Higgs dans le vide.

Pourquoi ne peut-il pas remonter jusqu'au temps de Planck ?
L'échelle d'énergie ultime pour la physique, l'échelle de Planck, est de 10^{19} gigaélectronvolts (GeV). La découverte du Higgs s'est faite autour de 100 GeV. Nous avons pu gagner encore un facteur 10 en énergie. Mais nous sommes encore très loin. Maintenant, on a des indications qui montrent que la théorie actuelle du modèle standard de la physique des particules pourrait montrer des faiblesses bien en deçà de l'échelle de Planck…

Est-ce qu'il nous permettrait tout de même de tester certaines hypothèses de la « première seconde », comme la supersymétrie ?
Oui. Si la supersymétrie existe, elle est de telle sorte que les particules supersymétriques (les superpartenaires) ont des masses élevées. De plus, la particule supersymétrique neutre la plus légère pourrait être stable à des échelles de temps cosmologiques et constituer un excellent candidat à la matière noire. Et ce n'est pas tout : il est également impossible de construire une théorie supersymétrique sans qu'il y ait au moins cinq « bosons de Higgs » — trois neutres et deux chargés —, et pour l'heure on n'en a découvert qu'un. Ces bosons de Higgs et les superpartenaires sont donc activement recherchés au LHC, car ils sont un enjeu majeur pour la physique des hautes énergies.

Propos recueillis par É.-O. E.

Cependant, aussi séduisante soit-elle, la grande unification ne marche pas si l'on s'en tient au seul cadre du modèle standard, cette théorie qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions. Les forces ne se rencontrent pas exactement. *« Ce qui laisse penser qu'il aurait pu y avoir une symétrie plus grande, qui unifiait toutes ces forces »*, pointe Patrick Peter. Cette symétrie plus grande pourrait être ce que l'on appelle la supersymétrie. *« Dans ce cadre-là, on a une unification beaucoup plus précise »*, appuie Julien Baglio. Qu'est-ce que cela implique pour l'Univers ? En fait, beaucoup de choses. *« La supersymétrie est une symétrie de l'espace-temps, c'est une extension de l'espace-temps ordinaire,* poursuit le chercheur. *Il existerait donc comme un superespace, fait de nouvelles coordonnées. »* De plus, la supersymétrie permet de relier entre elles des particules de types différents : les fermions et les bosons. Les fermions, ce sont les particules de matière, comme l'électron, le proton ou le neutron. Les bosons, eux, correspondent aux particules vectrices des interactions, comme le photon dans le cas de l'électromagnétisme. Relier par supersymétrie les fermions et bosons connus ne fonctionne pas. *« La seule manière de faire, c'est de relier les bosons qu'on connaît à des fermions qu'on ne connaît pas, et inversement. Ces particules inconnues, ce sont les superpartenaires »*, décrit Pierre Fayet, physicien à l'École normale supérieure à Paris, qui a théorisé l'existence des superpartenaires. Autrement dit, l'ère de grande unification, si tant est qu'elle soit telle qu'on le pense, nous révèle que l'Univers pourrait être empli de particules jamais observées, si massives que même les collisionneurs de particules comme le LHC, qui tentent de s'approcher des conditions du Big Bang *(lire l'entretien ci-dessus)*, n'ont pu les mettre au jour. Et ce n'est pas le seul chamboulement d'ampleur de l'ère de grande unification. Car durant cette période, l'Univers a aussi été sujet à un phénomène difficilement concevable : l'inflation cosmique *(lire p. 34)*. ■ **É.-O. E.**

L'inflation cosmique impose sa loi

Le Big Bang aurait été suivi d'une brusque dilatation de l'espace et du temps, beaucoup plus rapide que la vitesse de la lumière. Si cette théorie permet d'expliquer l'homogénéité de l'Univers, elle reste contestée par certains cosmologistes de renom. Une mission internationale va tenter d'observer les traces de l'inflation dans la première lumière de l'Univers.

L'Univers émergeait tout juste du Big Bang lorsqu'un phénomène d'une ampleur inouïe l'a bouleversé en profondeur : l'inflation cosmique. Elle s'est déclenchée environ 10^{-35} seconde après le Big Bang. La taille de l'Univers observable, alors bien plus petite que le noyau d'un atome, s'est trouvée tout à coup multipliée par un facteur 10^{26}, au moins. Pour se représenter un tel étirement, il faut imaginer le rayon d'un atome, 10^{-10} mètre, mesurant tout à coup une année-lumière, soit le quart de la distance qui nous sépare de l'étoile la plus proche. Et tout cela en 10^{-32} seconde ! C'est beaucoup plus rapide que la vitesse de la lumière. Mais les lois de la physique ne sont pas violées, car seules la matière et l'énergie ne peuvent pas dépasser la vitesse de la lumière. Tandis qu'au cours de l'inflation, c'est la trame même de l'espace et du temps qui s'est dilatée follement… Mais quelle mouche avait donc pu piquer les Américains Alan Guth et Paul Steinhardt et les Russes Andreï Linde et Alexeï Starobinski pour émettre une telle hypothèse, à l'orée des années 1980 ?

« *Historiquement, l'inflation est censée résoudre les problèmes posés par la théorie du Big Bang qui s'impose dans les années 1960,* explique Vincent Vennin, physicien à l'École normale supérieure de Paris. *Elle répondait notamment à deux questions : pourquoi l'Univers est-il plat ? Et pourquoi est-il homogène, ce que l'on appelle le problème de l'horizon. Depuis les années 1980, d'autres explications ont émergé pour les résoudre, mais je considère, comme la majorité des cosmologistes, que l'inflation demeure la meilleure.* »

Trouver le mécanisme répulsif qui contrecarre la gravitation

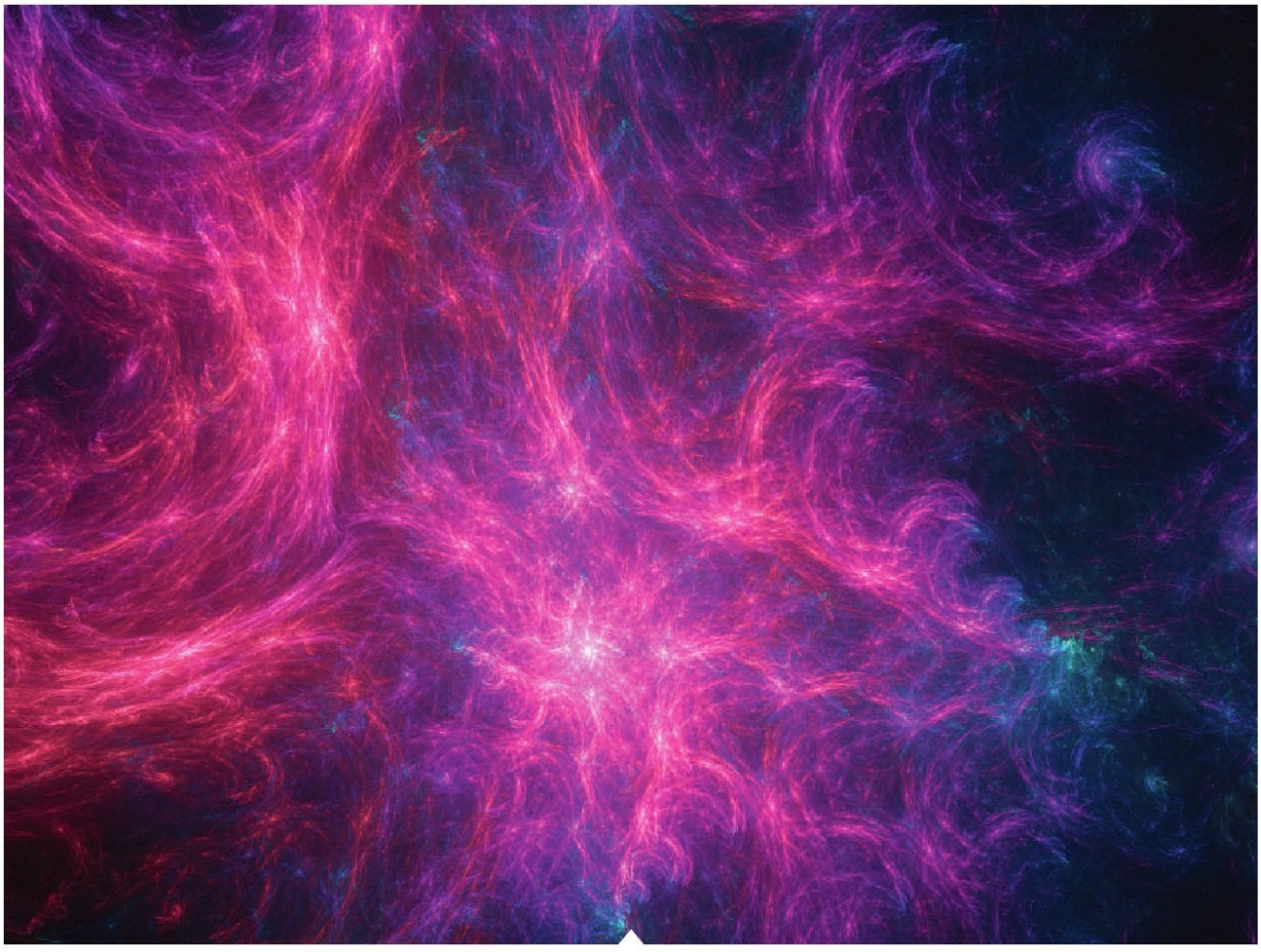
Pour comprendre comment l'inflation est à la manœuvre, prenons l'exemple de l'homogénéité que l'on peut résumer ainsi : l'Univers observable est aujourd'hui si vaste — son rayon est d'environ 46 milliards d'années-lumière — qu'il comporte des zones trop éloignées les unes des autres pour que la lumière ait eu le temps de voyager entre elles depuis le Big Bang. Autrement dit, elles n'ont jamais pu échanger d'informations ni quoi que ce soit, puisque rien ne va plus vite que la lumière. « *Elles ne devraient donc pas se ressembler,* souligne Vincent Vennin. *Car il n'y a aucune raison que l'Univers soit homogène sur des distances plus grandes que la distance maximale parcourue par la lumière. Or, les observations de l'Univers lointain réalisées dans les années 1970 ont montré au contraire qu'il était très homogène, avec partout la même densité de matière, d'énergie, le même nombre de galaxies, avec les mêmes propriétés, etc. D'où l'idée de cette phase d'expansion très accélérée, l'inflation, qui, en dilatant l'Univers bien plus vite que la vitesse de la lumière, a permis que des régions autrefois en contact soient désormais très éloignées les unes des autres.* »

Cette hypothèse drastique ne fait guère l'unanimité à l'époque, car si elle a le mérite de résoudre l'intriguant problème de l'horizon, elle en pose un autre : l'Univers à grande échelle est régi par la force de gravité. Elle est attractive. On ne s'attendrait donc pas à ce que l'Univers se dilate éperdument… Quel mécanisme répulsif pouvait ainsi contrecarrer la gravitation ? Pour l'imaginer,

VINCENT VENNIN

« Les cosmologistes ont compris que considérer l'Univers sous l'emprise de la seule gravitation était une vision très classique »

Vincent Vennin, physicien à l'École normale supérieure de Paris



D. PARKER/SPL/SUCRÉ SALÉ

L'inflation cosmique, théorie développée dans les années 1980, explique comment des fluctuations quantiques d'une zone microscopique de l'Univers ont semé les graines des très grandes structures du cosmos, comme les amas de galaxies et filaments galactiques (vue d'artiste).

il fallait une révolution conceptuelle. *« Dès les années 1980, les cosmologistes ont compris que considérer l'Univers sous l'emprise de la seule gravitation était une vision finalement très "classique". Ce serait vrai s'il était composé de particules dotées d'une masse. Mais à sa naissance, l'Univers possède une énergie si considérable que la matière ne peut plus être décrite en termes de particules. Il faut utiliser la notion de champs, plus précisément des champs quantiques. Or, avec ces entités, il est possible de concevoir un phénomène répulsif… »*, détaille Vincent Vennin
Un champ quantique est aux particules ce qu'un lac serait aux molécules d'eau. Un lac occupe une région de l'espace, et tout objet se trouvant dans le même espace que lui subira l'action des molécules d'eau. En clair, il sera mouillé ! De la même façon, un champ quantique confère à l'espace qu'il occupe des propriétés particulières, propres à la particule (photon, électron, muon, boson de Higgs…) qu'il incarne. Toute comme les molécules d'eau sont indiscernables dans le lac, ces particules sont fondues dans le champ. Mais derrière cette tentative pour visualiser la théorie des champs quantiques, il faut surtout retenir que la matière à haute énergie est décrite par des champs qui sont un tout autre objet que des particules.

Ainsi, dès 1980, Alan Guth fait l'hypothèse que l'Univers juste après le Big Bang baigne dans un champ scalaire. Pour se représenter ce qu'est un champ scalaire, une simple carte météo suffit. Elle fait correspondre à chaque ville une température. De la même façon, un champ scalaire fait correspondre un nombre en chaque point de l'espace. Dans le cas qui nous concerne — l'inflation —, l'Univers est ainsi baigné d'un champ scalaire qui se manifeste sous la forme d'une particule nommée opportunément « inflaton ». Sébastien Renaux-Petel, cosmologiste à l'Institut d'astrophysique de Paris, nous le présente : *« Le champ d'infla-*

tons fait correspondre en tout point de l'espace une densité d'énergie. Cette densité se décompose en une énergie cinétique et une énergie potentielle. Prenons l'exemple d'une balançoire pour distinguer les deux. L'énergie potentielle est maximum lorsque la balançoire est en haut, et son énergie cinétique minimale. Lorsqu'elle est au plus bas, son énergie cinétique est maximale et son énergie potentielle nulle. Le balancement correspond à une conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique, et réciproquement. »

La chasse à l'inflaton est ouverte

L'inflation va se déclencher pour une raison en apparence toute simple : juste après le Big Bang, l'énergie potentielle de l'inflaton est supérieure à son énergie cinétique. Ce qui sera lourd de conséquences, comme l'explique Sébastien Renaux-Petel. « *Pour comprendre, il faut ajouter une notion fondamentale en physique des champs : la pression exercée par l'énergie, qui est la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Comme l'énergie potentielle est supérieure à l'énergie cinétique, alors cette pression est négative. Or, Albert Einstein a démontré avec la théorie de la relativité générale que la matière et l'énergie influent sur la dynamique de l'espace-temps. Et d'après les équations de la relativité, cette densité d'énergie à pression négative dilate l'espace-temps…* »

Voilà donc pourquoi l'Univers va s'agrandir… Mais pourquoi aussi violemment ? « *Car la densité d'énergie de l'inflaton reste constante, même lorsque l'Univers grandit.* A contrario *de l'énergie classique qui, elle, se dilue* », ajoute le cosmologiste. De fait, si vous chauffez votre studio de 20 m² à la température de 20 °C et que tout à coup vous doublez sa surface, la température va baisser. L'action de l'inflaton ne diminue pas à mesure que l'espace grandit, bien au contraire : comme sa densité est constante, plus l'Univers grandit et plus la force qui le dilate grandit avec lui. D'où le caractère exponentiel de l'inflation. Toutefois, son énergie potentielle diminue lentement, comme si elle descendait une pente douce. Et finalement, l'énergie cinétique la dépasse. La pression devient positive et l'inflation s'arrête. « *Toute l'énergie de l'inflaton va servir à créer les premières particules baryoniques, qui mèneront aux atomes* [lire p. 39] », conclut Sébastien Renaux-Petel. Ce qui fait de nous les lointains descendants de l'inflaton.

Admettons, mais il y a un hic. Quel est cet « inflaton » responsable de tout ? Pour l'heure, ce n'est qu'un nom de code. Personne ne sait qui est cette particule et son champ associé. Mais depuis quarante ans, la chasse à l'inflaton est ouverte, et elle suscite un certain enthousiasme. Il y a tellement de modèles d'inflation, ne reposant pas toujours sur un champ scalaire d'ailleurs, que l'on peut en faire une encyclopédie… au sens propre ! En mars 2023, Vincent Vennin a ainsi sorti une nouvelle version de son *Encyclopaedia Inflationaris*, dix ans après la première qui correspondait à sa thèse de doctorat. Entre-temps, elle a doublé de volume, atteignant près de 800 pages et compilant une centaine de modèles d'inflation. « *Autant de modèles pour un seul phénomène, c'est probablement unique en physique,* note Vincent Vennin. *Chacun fait des prédictions, sur la*

Le « grand rebond », théorie alternative à l'inflation, postule que l'Univers serait issu de la contraction d'un précédent, ce qui expliquerait son homogénéité. ►

KENN BROWN MONDOLITHIC STUDIOS

ALTERNATIVE

Les contestataires de la théorie de l'inflation

Si l'inflation est aujourd'hui très largement admise par la communauté des cosmologistes, elle reste contestée par quelques personnalités de poids. À commencer par l'Américain Paul Steinhardt, l'un des auteurs de la théorie dans les années 1980. L'autre sceptique majeur est le Britannique Roger Penrose, prix Nobel en 2020 pour ses travaux sur les trous noirs… « *Leurs critiques sont de plusieurs ordres,* note le physicien Vincent Vennin. *On ne sait toujours pas ce qu'est l'inflaton. Et tant qu'on ne l'aura pas identifié formellement, l'inflation restera une théorie "non spécifiée", qui peut être incarnée par plusieurs modèles. L'autre critique qui revient souvent consiste à savoir comment elle a débuté. Longtemps, les calculs mathématiques menés afin de démontrer comment l'inflation a rendu l'Univers homogène partaient du principe que l'Univers était homogène dès le départ. Sinon, les équations étaient trop compliquées à résoudre. La démonstration tombait un peu à plat. Mais depuis cinq ans environ, la donne change grâce à la relativité numérique qui permet désormais de faire des calculs à partir d'un univers inhomogène.* » *(Lire l'encadré p. 38.)*

Par ailleurs, les détracteurs de l'inflation proposent une alternative : l'Univers serait issu de la contraction d'un précédent. C'est le concept de temps cyclique cher à Penrose *(lire notre dossier sur l'avant-Big Bang dans* S. et A. *n° 909)*, ou théorie du grand rebond, défendue par Paul Steinhardt. Selon eux, ce modèle aurait l'avantage d'éviter le Big Bang, cette singularité initiale que la physique n'explique pas. Et l'Univers s'étant recontracté sur lui-même avant de se redilater, cela expliquerait son homogénéité. « *Ce dernier point est exact,* remarque Sébastien Renaux-Petel de l'Institut d'astrophysique de Paris, qui a travaillé sur ce modèle. *L'ennui, c'est la difficulté à décrire ce qu'il advient des fluctuations de densité d'énergie qui peuplent l'Univers lors du rebond, cette phase de transition qui mène à l'Univers en expansion. Voilà pourquoi cette hypothèse demeure minoritaire.* »

composition de l'Univers, sa géométrie, etc. Il était nécessaire de les réunir, car grâce aux collisionneurs de particules comme le LHC, qui tentent de faire émerger de nouvelles particules, aux satellites qui cartographient l'Univers, de Planck à Euclid, nous accumulons de nouvelles données. Il faut alors les confronter aux prédictions des différents modèles, ce qui permet d'en éliminer un certain nombre. »

C'est ainsi que parmi tous les modèles, ceux à champ scalaire apparaissent comme les plus aptes à décrire l'Univers tel qu'on l'observe aujourd'hui. Mais jusqu'à présent, un seul de ce type a été découvert : le boson de Higgs. La particule, observée pour la première fois au LHC du Cern à Genève (Suisse) en 2012, a été arrachée à un champ de Higgs qui se trouve être justement un champ scalaire, le seul connu à ce jour. Ce qui fait de lui un candidat pour constituer l'inflaton, sans pour autant que les chercheurs disposent de la preuve ultime qu'il s'agit bien de lui. D'autres mesures seront nécessaires pour distinguer ce modèle des autres *(lire l'encadré p. 38)*.

Mais pour Sébastien Renaux-Petel, si la quête de la source de l'inflaton est intéressante en soi, elle n'est pas nécessaire pour avancer. Car la preuve de l'inflation est là, sous nos yeux, dans le spectacle

JEAN MOUETTE /IAP-CNRS-SU

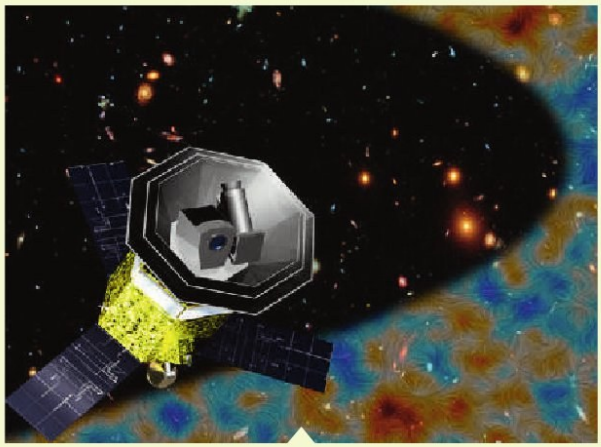
« D'après les équations de la relativité, cette densité d'énergie à pression négative dilate l'espace-temps »

Sébastien Renaux-Petel, cosmologiste à l'Institut d'astrophysique de Paris

MISSION LITEBIRD

À la recherche des preuves de l'inflation

Si l'inflation reste inaccessible à nos regards, il doit être possible de voir la trace fossile de son action. C'est l'objectif de la mission internationale Litebird, dirigée par l'Agence spatiale japonaise Jaxa. *« Litebird ressemble au satellite Planck, mais en bien plus sensible,* détaille Matthieu Tristram, cosmologiste au CNRS et membre de la mission. *Ce télescope va mesurer les photons constituant la première lumière de l'Univers. Mais si Planck se concentrait sur leur énergie, Litebird va mesurer leur polarisation, une caractéristique de leur champ électromagnétique. Nos modèles prévoient que l'inflation a produit des ondes gravitationnelles primordiales, une vibration très forte de l'espace-temps, qui ont laissé une trace dans le plasma qui emplissait l'Univers à ce moment-là. Il s'agit d'une polarisation particulière des photons, dite de mode B. Elle doit être encore visible dans le fond diffus cosmologique. »* Le lancement de la mission est prévu vers 2032.



INAF/OAS

Le télescope spatial Litebird cherchera les traces de l'inflation cosmique à partir du rayonnement fossile (vue d'artiste).

Dans un autre domaine, la simulation numérique est un puissant outil pour étudier l'inflation. Par exemple, la plateforme GRChombo, un code en open source mis à disposition des spécialistes de la relativité générale. Sa cofondatrice Katy Clough, de l'université Queen Mary de Londres (Royaume-Uni), explique : *« L'inflation homogénéise l'Univers. Nos simulations doivent donc tester si elle peut s'enclencher à partir d'un univers inhomogène. Souvent, cela ne marche qu'à partir d'un milieu homogène. Nos récents travaux ont montré que certains modèles fonctionnent, mais il reste des questions sur la validité des hypothèses simplificatrices que nous faisons afin de modéliser l'Univers tout entier. »*

même de l'Univers tel qu'il se présente à nous. *« L'inflation a permis des prédictions bien avant les observations, et elles ont été vérifiées. La répartition des galaxies témoigne de l'action de ce champ scalaire primordial,* explique le cosmologiste. *Elle résulte des fluctuations quantiques du champ. »*

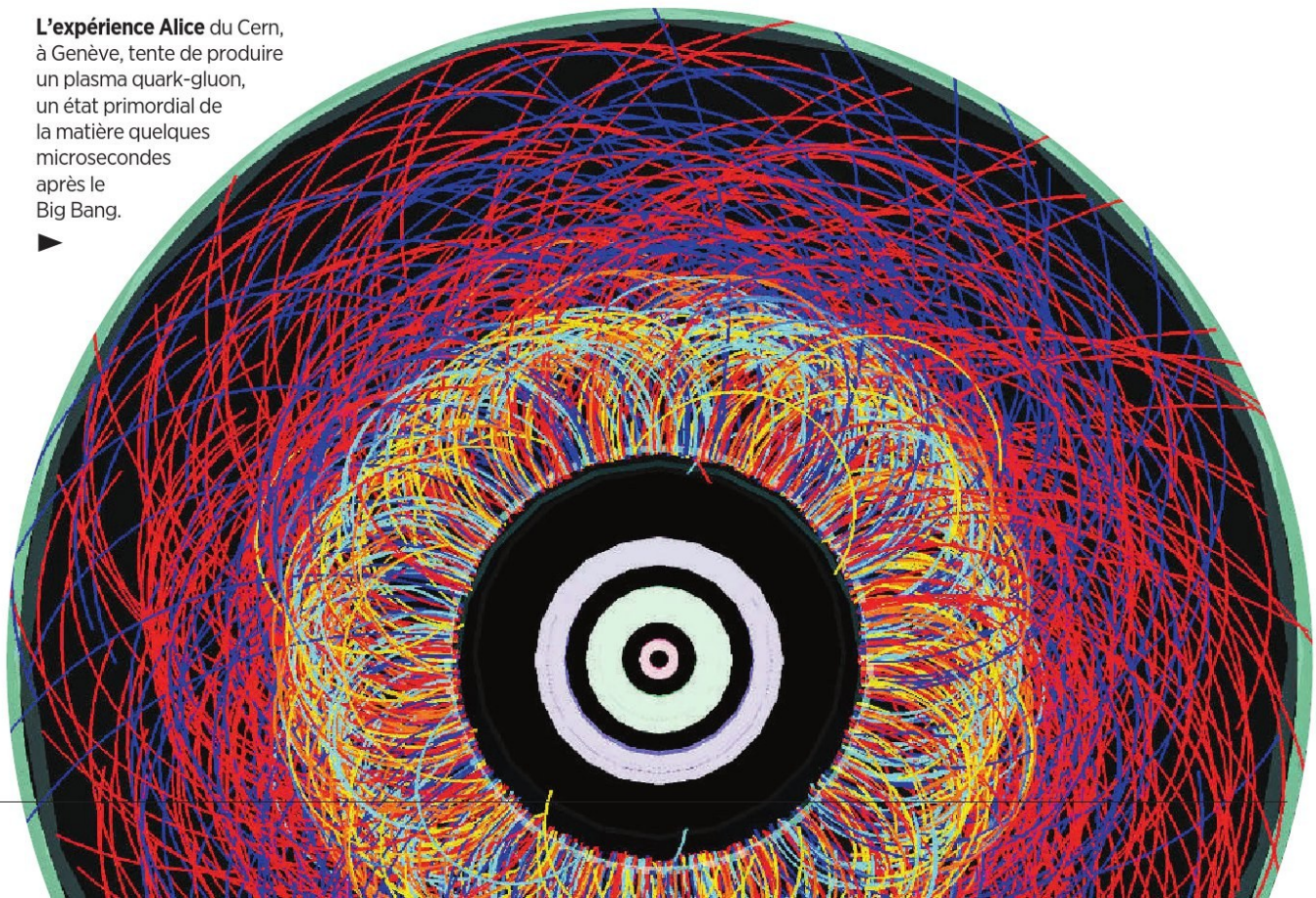
Nous ne pouvons pas voir les fluctuations du champ, 10^{-35} seconde après le Big Bang, mais il est possible de s'en approcher grâce à une « photographie » de l'Univers, prise 380 000 ans après l'inflation grâce au satellite Planck en 2013. C'est la mesure du fond diffus cosmologique, ou « première lumière de l'Univers ». Évidemment, 380 000 ans cela paraît bien loin de l'époque de l'inflation, mais à l'échelle de l'Univers — âgé aujourd'hui de 13,8 milliards d'années —, c'est tout proche. Cette première image révèle un univers alors uniquement composé d'un plasma à très haute énergie, où les photons de lumière se libèrent de la matière et circulent librement pour la première fois. Ils dessinent alors un univers formé de zones un tout petit peu plus riches en énergie que d'autres. La matière va se concentrer sur ces zones, ce qui débouchera sur des amas de galaxies quelques centaines de millions d'années plus tard. *« Les mesures précises de Planck confirment que ces inhomogénéités sont issues des fluctuations quantiques de la durée de l'inflation. On peut donc affirmer qu'il y a une continuité entre les fluctuations de ce champ, les inhomogénéités mesurées du fond diffus cosmologique et la structure de l'Univers contemporain. Le mécanisme détaillé de l'inflation nous échappe encore, mais l'étude des fluctuations offre la perspective de le découvrir »*, conclut le cosmologiste. ■ **F. N.**

La naissance des particules

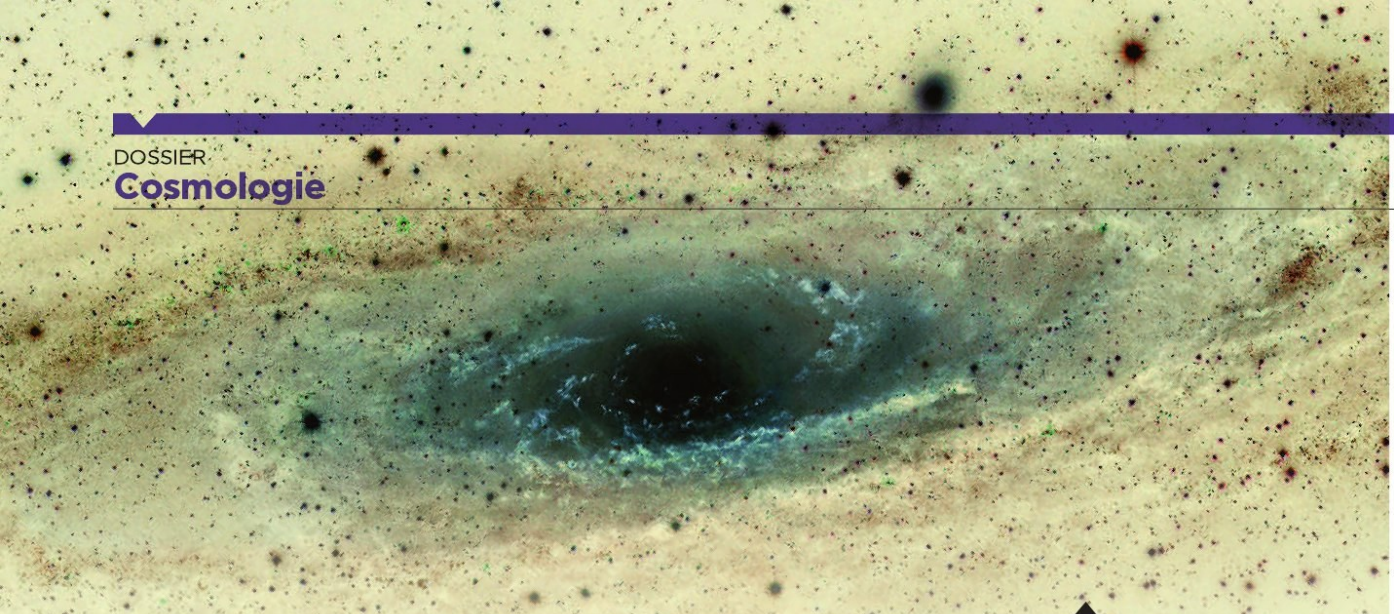
Après la spectaculaire inflation, l'Univers prend lentement une figure familière. Les particules acquièrent une masse, et les quarks et les gluons s'assemblent pour former les premiers protons et neutrons…

L'inflation a fait son œuvre, et notre univers observable est maintenant… vide. Tout a été dilué de manière gigantesque. *« Il ne reste plus rien, l'Univers a considérablement refroidi »*, appuie Patrick Peter, astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris. Pourtant, difficile d'imaginer qu'il n'ait pu rien exister dans l'Univers : comment expliquer, sinon, que vous lisiez ces lignes ? En fait, quand l'inflation s'arrête, l'inflaton, qui s'obstinait à repousser frénétiquement les frontières du cosmos, se désintègre. La quantité d'énergie phénoménale qui le caractérise est alors transformée en particules, qui se créent à tout va. *« C'est donc l'énergie associée à l'espace-temps lui-même qui est convertie en particules,* illustre Yves Sirois, physicien au laboratoire Leprince-Ringuet à Paris. *Mais ces particules ne sont pas encore telles qu'on les connaît aujourd'hui, elles n'ont pas de masse. »* Dans le même temps, la température de l'Univers augmente brutalement et retrouve son niveau pré-inflation. Cette période s'appelle le réchauffement, et elle prend fin rapidement. Par la même occasion, l'« ère de grande unification » se termine *(lire p. 34)*. *« Cette sortie de*

CERN/SPL/SUCRÉ SALÉ



L'expérience Alice du Cern, à Genève, tente de produire un plasma quark-gluon, un état primordial de la matière quelques microsecondes après le Big Bang.



Les galaxies d'antimatière (illustration) n'existent pas ; pourtant matière et antimatière ont jailli ensemble du Big Bang.

ROBGENDLERASTROPICS.COM

HYPOTHÈSE

Comprendre la disparition de l'antimatière

L'antimatière a disparu de notre univers. Comment ? Lorsque matière et antimatière se rencontrent, ils s'annihilent. L'Univers primordial devait donc contenir plus de matière que d'antimatière : *« Pour 10 milliards de particules d'antimatière, il y en avait 10 milliards et une de matière »*, estime Guillaume Pignol, chercheur à l'université Grenoble Alpes. L'objectif est donc de trouver ce qui a créé une différence entre matière et antimatière, une asymétrie.
L'hypothèse qui a longtemps dominé est que cette asymétrie daterait de la brisure électrofaible. Elle serait née du fait que le champ de Higgs n'avait pas une valeur uniforme dans tout l'Univers, rompant ainsi une symétrie fondamentale entre particules et antiparticules *« Ça n'a pas été vérifié, on est donc en passe de l'éliminer. »*
Une nouvelle hypothèse imagine que les particules élémentaires pourraient avoir des propriétés plus complexes qu'on le pense, révélant des brisures de symétrie encore inconnues remontant à la « grande unification ». Certaines conséquences de cette théorie pourraient être testées en laboratoire. *« Le neutron est neutre car il ne porte aucune charge. Mais la nouvelle hypothèse prédit que si le neutron est neutre, c'est parce qu'il posséderait une charge positive et une charge négative qui s'annulent. »*

l'ère de grande unification est marquée par la séparation de l'interaction forte des interactions faible et électromagnétique, qui, elles, restent unifiées en une interaction électrofaible », précise Yves Sirois. L'Univers observable est alors environ 10^{27} fois plus petit qu'aujourd'hui, son diamètre n'étant que d'un mètre, et il entre dans une nouvelle ère, dite de radiation.
« À partir de ce moment, l'Univers est à l'équilibre thermique, c'est-à-dire qu'il peut être décrit uniquement par une température », dépeint Sébastien Renaux-Petel, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. Cet univers est dominé par les photons, les particules de lumière, et tout ce qui se comporte comme eux. Car si le photon est la seule particule à être de masse nulle, les autres évoluent alors dans un univers si énergétique *« qu'ils se comportent eux aussi comme s'ils étaient de masse nulle,* précise le chercheur. *Toutes ces particules sans masse, c'est de la radiation. C'est pourquoi l'Univers est complètement dominé par elle. »*

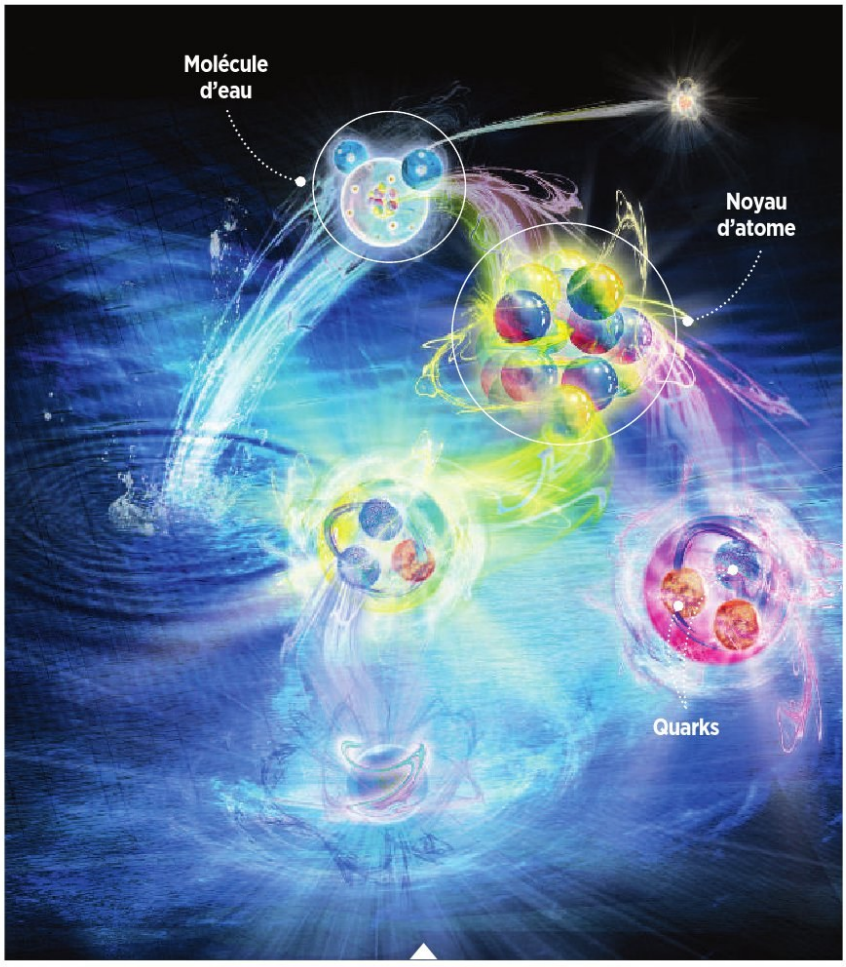
Le passage du faux vide au vrai vide

Pendant ce temps, l'Univers continue de s'étendre et de se refroidir. À 10^{-12} seconde, c'est l'interaction électrofaible qui cède et donne naissance aux deux dernières interactions fondamentales manquantes : la force faible et la force électromagnétique *(voir l'infographie p. 30)*. Le responsable de cette brisure n'est autre que le champ de Higgs. Jusqu'alors, ce champ de Higgs était nul. *« Mais au moment de la transition électrofaible, on passe d'un faux vide à un vrai vide, qui est le vide quantique* [composé de particules virtuelles apparaissant et disparaissant sans cesse] *que l'on connaît aujourd'hui »*, décrit Yves Sirois. Autrement dit, le (faux) vide qui régnait jusqu'alors n'était pas totalement stable. Ce n'est qu'à la transition électrofaible qu'il réussit à se stabiliser, devenant ainsi le « vrai » vide.

« Ce vrai vide est imprégné d'un champ de Higgs qui n'est plus nul », poursuit Yves Sirois. Et c'est en interagissant avec celui-ci que les particules acquièrent enfin leur masse. *« À ce moment, les particules et les interactions ont toutes leur forme actuelle. »* La taille de l'Univers est à peu près celle de l'orbite de la Terre autour du Soleil, sa température est d'environ 10^{16} °C, et il entre dans l'ère des quarks.

Une bouillasse de particules nommée plasma

Les quarks sont des particules élémentaires qui, liées ensemble par l'interaction forte, forment les hadrons, comme les protons ou les neutrons. Les particules qui cimentent les quarks sont appelées gluons, et *« quarks comme gluons ne peuvent être étudiés indépendamment, ils sont nécessairement confinés dans des hadrons,* rapporte Émilie Maurice, physicienne au laboratoire Leprince-Ringuet. *Du moins, c'est l'état de la matière aujourd'hui. »* Car durant l'ère des quarks, la densité de matière dans l'Univers est bien supérieure à ce qu'elle est maintenant. *« Dans ces conditions, les quarks et gluons sont déconfinés : ils sont libres et peuvent bouger indépendamment les uns des autres »*, poursuit la chercheuse. Ils forment alors un plasma, *« c'est-à-dire une bouillasse où les particules bougent les unes à côté des autres sans jamais former de structures »*, résume Patrick Peter. Et ce plasma se comporte comme un fluide parfait, de viscosité nulle. *« C'est pourquoi toute communication entre les particules est impossible »*, précise Émilie Maurice, qui étudie le plasma de quarks-gluons en le reproduisant au sein d'accélérateurs de particules. *« On pense que ce plasma existe aussi au sein des étoiles à neutrons, des astres très denses, mais c'est un peu compliqué d'aller les étudier »*, note avec un sourire la physicienne.



H. RITSCH/SPL/SUCRÉ SALÉ

L'ère des quarks s'achève lorsque les quarks se lient pour former des neutrons et des protons qui composent les noyaux d'atomes. Ensuite viendront les molécules comme l'eau.

Au bout d'une microseconde (soit 10^{-6} seconde), la taille de l'Univers avoisine une année-lumière. Sa densité descend suffisamment pour que quarks et gluons commencent à s'apparier. C'est le début de l'ère hadronique. À mesure que l'Univers s'étend et refroidit, quarks et gluons se rassemblent. Ils forment ainsi les premiers protons et les premiers neutrons. Cette ère se déroule à toute vitesse, et sa fin marque la fin de la première seconde de l'Univers… Tous les protons et les neutrons sont formés. La température est encore de 10^{12} °C. Les premiers atomes vont bientôt entrer en piste et écrire l'histoire d'un cosmos désormais empli de matière. ■ **É.-O. E.**

SYLVAINE PIEYRE

« On pense que ce plasma de quarks et gluons existe aussi au sein des étoiles à neutrons, mais c'est un peu compliqué d'aller les étudier »

Émilie Maurice, physicienne au laboratoire Leprince-Ringuet à Paris

JULIEN COQUENTIN/HANSLUCAS.COM

Qualifié de « peintre du noir », Pierre Soulages (1919-2022) joue avec cette teinte et multiplie les médiums composés de noir de fumée, noir d'ivoire, noir de Mars… (Ici, huile et acrylique sur toile, 9 juillet 2000, en exposition au musée de Rodez.)

Noir
De la couleur à la matière

Derrière cette teinte, considérée pendant des siècles comme une « non-couleur », se cachent des substances minérales, végétales, animales ou artificielles qui lui procurent ses nuances plus ou moins foncées. Leur étude permet d'en savoir plus sur la fabrication et l'utilisation du noir, de la préhistoire à aujourd'hui.

Par Franck Daninos

Anish Kapoor, l'un des plus célèbres sculpteurs contemporains, présentait ses œuvres au palais Strozzi de Florence (Italie) en février. Miroirs en acier poli créant des perspectives inversées, gigantesques blocs de cire rouge sang semblant avancer sur des rails… Autant de réalisations brouillant les frontières entre « Illusion et réalité », titre de l'exposition. Une salle abritait aussi une collection d'objets d'un noir vertigineux, enduits d'un matériau considéré comme l'un des plus sombres fabriqués à ce jour. Dénommé Vantablack, il est constitué d'un réseau de nanotubes de carbone dix mille fois plus fins qu'un cheveu… qui absorbent 99,965 % de la lumière *(lire l'encadré p. 44)*! À tel point que les sculptures qui en sont recouvertes apparaissent sans reliefs ni détails en donnant *« l'illusion du vide »* alors qu'elles sont *« emplies d'obscurité »*, expliquait le plasticien britannique lors du vernissage.

Derrière le noir, couleur à part qui a souvent fasciné ou questionné les artistes et a été considérée durant des siècles comme une « non-couleur », se cache en effet une variété de substances. Elles suscitent depuis une dizaine d'années un intérêt nouveau. *« Les études académiques s'étaient surtout intéressées au noir en tant que teinte, ses aspects symboliques et esthétiques en particulier,* observe Georges Roque, historien d'art et directeur de recherche honoraire au CNRS. *Par idéalisme, sans doute aussi*

par facilité, elles faisaient littéralement abstraction des matières qui la constituent. » Mais de plus en plus de travaux s'efforcent de caractériser leur nature dans les objets d'art et vestiges patrimoniaux. « *Ils dévoilent une multitude de substances minérales, végétales, animales ou artificielles produisant autant de nuances foncées* », s'enthousiasme Agnès Lattuati-Derieux, ingénieure chimiste au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF). Avec, à la clé, des informations précieuses sur les procédés de fabrication, les implications sociales et économiques ou la conservation des œuvres.

Avant de présenter quelques exemples, rappelons d'où viennent les couleurs. « *Elles résultent des interactions entre matière et lumière, celle perçue par l'œil humain en particulier dans les longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nanomètres* », pose Mathieu Thoury, de l'Institut photonique d'analyse non destructive européen des matériaux anciens (Ipanema). Ainsi, une tomate est rouge parce qu'elle absorbe les longueurs d'onde courtes (jusqu'à 605 nm) de cette gamme, réfléchissant les autres vers nos yeux. Tandis qu'une feuille verte capte les ondes spécifiques au rouge, au jaune et au bleu, ne reflétant que celles situées entre 520 et 560 nm. Or, les pigments noirs ont comme particularité de piéger la quasi-totalité de la lumière visible. « *Leurs spectres de réflectance ressemblent ainsi à des encéphalogrammes plats* », relève Mathieu Thoury.

À l'échelle microscopique, ce sont les électrons constitutifs des atomes qui jouent un rôle clé. Selon deux types de phénomènes. Le premier concerne certaines formes ionisées de fer et de manganèse qui composent des minéraux comme la magnétite ou la manganite. « *Du fait de leurs caractéristiques énergétiques, leurs électrons absorbent une part très importante de la lumière* », indique Ina Reiche, directrice de recherche CNRS au C2RMF. Le second mécanisme se manifeste dans les matières carbonées, où des électrons dits délocalisés (qui se déplacent librement dans le matériau) en piègent eux aussi une large portion. Le diamant, transparent, ne possède pas de tels électrons. Ils sont présents, en revanche, dans le graphite des mines de crayon, les hydrocarbures (bitume, goudron…) ainsi que les matières organiques végétales ou animales (très riches en carbone) ayant subi une combustion, à l'instar du charbon de bois.

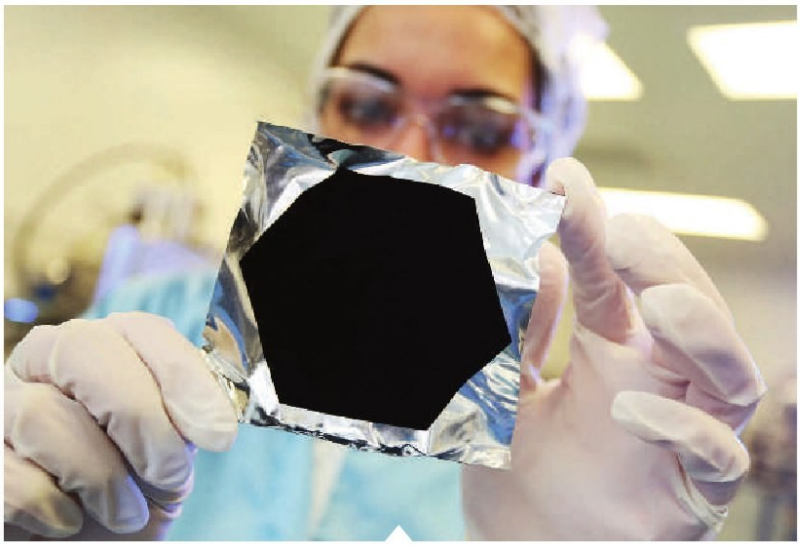
Les charbons de bois, premiers pigments de l'art préhistorique

De tels morceaux de branches calcinées, des « fusains », font partie des premiers pigments de l'art préhistorique. Datés de -36 000 ans, les plus anciens spécimens ont été retrouvés dans la grotte Chauvet, en Ardèche. Utilisés pour crayonner des mammouths ou rhinocéros laineux, ils provenaient de charbons de pin sylvestre, ont établi en 2018 des archéobotanistes français. « *C'est la première utilisation connue de la couleur noire !* » souligne Ina Reiche. Soit dix mille ans environ après la plus ancienne œuvre figurative identifiée à ce jour : un sanglier dessiné avec des ocres rouges dans une grotte indonésienne, qui en 2021 a été datée d'au moins -45 000 ans. Il faut rester prudent : d'autres pigments n'ont peut-être pas été conservés. Mais le rouge puis le noir seraient ainsi les couleurs originelles, « *probablement en raison de la disponibilité des gisements d'ocres et charbons*

APPLICATION

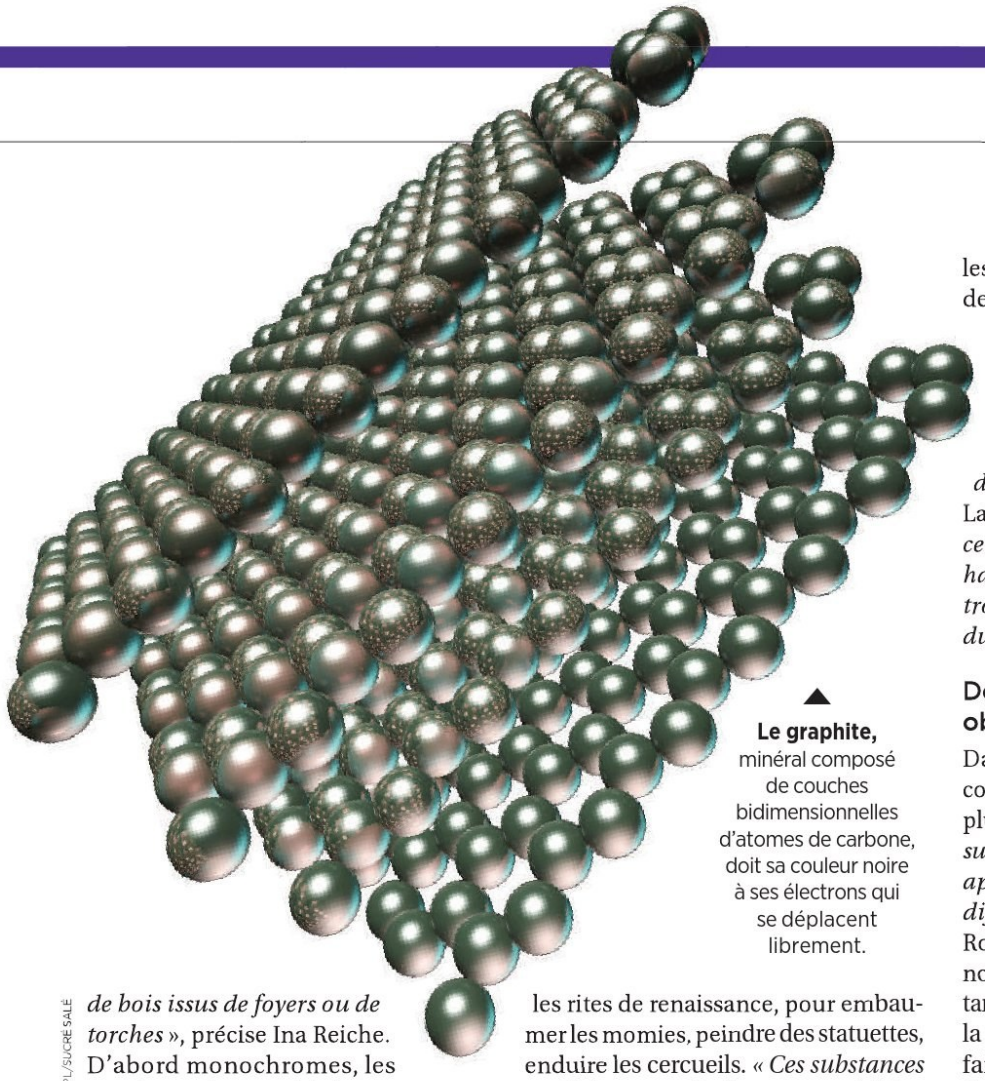
Des télescopes plus sensibles avec le Vantablack

En 2016, le sculpteur britannique Anish Kapoor s'arrogeait l'exclusivité artistique du Vantablack, l'un des matériaux les plus noirs au monde, composé de nanotubes de carbone alignés verticalement tels les arbres d'une forêt. Mais c'est pour un usage scientifique qu'il a été conçu quatre ans auparavant par la start-up anglaise Surrey NanoSystems. Objectif : améliorer la sensibilité des télescopes spatiaux en absorbant, à l'intérieur des systèmes optiques, les rayonnements parasites issus d'objets lumineux non ciblés. Le Vantablack réfléchit ainsi 17 fois moins de lumière que les peintures du télescope Hubble. Depuis 2015, il a été utilisé dans divers instruments des agences spatiales américaine, indienne et européenne.



SURREY NANOSYSTEMS

Composé de nanotubes de carbone, le Vantablack absorbe 99,965 % de la lumière.



R. KIGHTLEY/SPL/SUCRÉ SALÉ

Le graphite, minéral composé de couches bidimensionnelles d'atomes de carbone, doit sa couleur noire à ses électrons qui se déplacent librement.

de bois issus de foyers ou de torches », précise Ina Reiche. D'abord monochromes, les représentations pariétales vont peu à peu se complexifier. À Lascaux, en Dordogne, la palette s'étend aux teintes jaunes (goethite) et violacées (hématite) parfois mélangées entre elles, avec des pigments noirs d'oxydes de fer et de manganèse combinés à des aluminosilicates.

Les matières noires de l'Égypte pharaonique offrent des exemples particulièrement intéressants de la complexité de certains mélanges. Associées aux limons noirs fertilisants du Nil et au dieu Osiris ressuscité des morts, elles étaient abondamment utilisées dans les rites de renaissance, pour embaumer les momies, peindre des statuettes, enduire les cercueils. « *Ces substances ont été sous-analysées, sous-exploitées, les archéologues estimant qu'elles contenaient surtout du bitume* », note Agnès Lattuati-Derieux. Or, elles peuvent aussi renfermer de la cire d'abeille, des résines et gommes végétales, des graisses et huiles de goudron, ainsi que des proportions variables de bitume. Des analyses publiées en 2023 montrent que des résines végétales provenaient, non pas de sources locales comme on le pensait, mais d'espèces endémiques d'Indonésie et du Sri Lanka, dévoilant ainsi de nouvelles routes commerciales ! Depuis 2020, une série de travaux examine aussi les éléments métalliques (porphyrines de nickel ou de vanadium) présents à l'état de traces dans les bitumes. Ils révèlent que ces substances visqueuses ont été rapportées de la mer Morte et d'Irak. « *Le bitume, le plus noir des matériaux égyptiens, devait donc coûter cher,* avance Agnès Lattuati-Derieux. *C'est sans doute pour cela qu'il était réservé aux cercueils des hautes couches de la société et qu'on en trouve de moins en moins, voire plus du tout, dans ceux des basses strates.* »

Des textiles noirs difficiles à obtenir, apanage des plus riches

Dans l'Europe médiévale, les habits de couleur noire étaient aussi l'apanage des plus riches, noblesse et clergé. « *Les tissus les plus sombres gardant leurs teintes après lavage faisaient partie des plus difficiles à obtenir* », signale Georges Roque. Ces teintes étaient produites, notamment, par une suite d'étapes partant d'un bleu très profond. La technique la plus courante consistait toutefois à faire réagir des tanins (noix de galle, écorces) avec des sulfates ou oxydes de fer. Générant un noir virant au marron, elle servait à teindre les textiles et fabriquer des encres. Mais ces pigments, acides, pouvaient dégrader les parchemins ou tissus et requéraient de grandes précautions. « *En raison de ces difficultés, les recettes étaient des secrets jalousement gardés. On les connaît donc encore mal, les documents historiques ne mentionnant que des généralités* », rapporte l'historien.

Il faudra attendre le milieu du XIXe siècle pour que les couleurs opaques se démocratisent. Le chimiste anglais John Lightfoot synthétise alors le noir d'aniline, premier colorant noir de synthèse. En mélangeant l'aniline (extraite du goudron de houille) à de l'acide chlorhydrique, du chlorate de potassium et du cuivre, on obtient en effet « *de longues chaînes moléculaires par des réactions d'oxydation* », détaille Irene Bilbao Zubiri, doctorante en chimie analytique à Sorbonne Université. Les substances

SÉBASTIEN DERIEUX

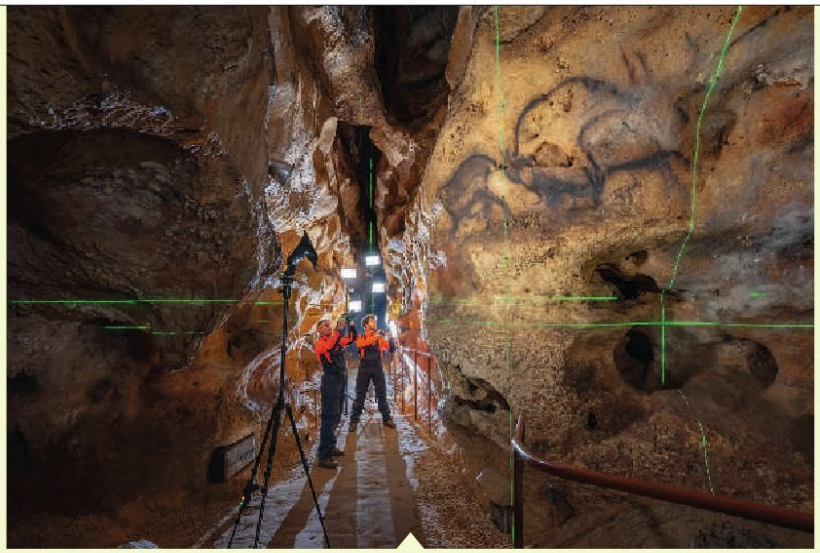
« Les substances de l'Égypte pharaonique ont été sous-analysées, les archéologues estimant qu'elles contenaient surtout du bitume »

Agnès Lattuati-Derieux, ingénieure chimiste au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF)

DATATION

Sous le manganèse, du charbon

Des prélèvements effectués en janvier dans la caverne préhistorique de Font-de-Gaume (Dordogne) livreront d'ici à la fin de l'année des informations importantes pour toutes les grottes ornées de la région, telle Lascaux. Ils concernent des dessins noirs, faits avec du charbon de bois, identifiés en 2020 sous les peintures polychromes de bisons et de rennes qui sont donc postérieures. Réalisées avec des oxydes de manganèse, ces peintures ne peuvent être datées de manière absolue. En analysant leur style, on estime qu'elles remontent à l'art magdalénien, de 17 000 11 000 ans. avant le présent. Or, les tracés au charbon récemment découverts peuvent être datés précisément, eux, grâce à la technique du carbone 14. *« On saura donc s'ils correspondent aussi à la période magdalénienne ou s'ils la précèdent de plusieurs siècles ou milliers d'années »*, annonce la chimiste Ina Reiche, qui participe aux travaux.



REMI FLAMENT / CENTRE DES MONUMENTS NATIONAUX

Certaines peintures rupestres de la grotte de Font-de-Gaume, en Dordogne, ont été réalisées au charbon de bois et vont faire l'objet d'une datation au carbone 14.

qui en résultent possèdent *« un très fort pouvoir colorant et coûtent souvent moins cher que les colorants naturels »*, précise-t-elle. Mais les réactions d'oxydation de l'aniline ne sont, au départ, pas suffisamment complètes, faisant verdir le noir. Au tournant du XXe siècle, les laboratoires européens et américains rivalisent ainsi pour les optimiser. *« Ils élaboreront des centaines de colorants noirs : un patrimoine industriel tombé dans l'oubli que nous nous efforçons actuellement de redécouvrir et de spécifier »*, confie Irene Bilbao Zubiri. Exploités massivement dans l'industrie textile, ces noirs de synthèse serviront aussi à teindre les cuirs, tapisseries et cheveux ou à fabriquer des encres pour l'impression photographique. Mais pas pour la peinture d'art, car ils tendent à s'éclaircir et à se dégrader sous l'effet de la lumière. Les matières naturelles, organiques ou inorganiques, restent ainsi privilégiées, même si elles posent d'autres problèmes : *« Lors du broyage, elles doivent être enrobées de grandes quantités d'huile ou autre médium pour devenir brillantes et être appliquées, ce qui augmente fortement le temps de séchage et la tension mécanique du matériau. Difficile à maîtriser, la peinture noire a donc souvent eu mauvaise réputation »*, rappelle Pauline Hélou-de La Grandière, restauratrice du patrimoine et doctorante à CY Cergy Paris Université.

P. HÉLOU-DE LA GRANDIÈRE

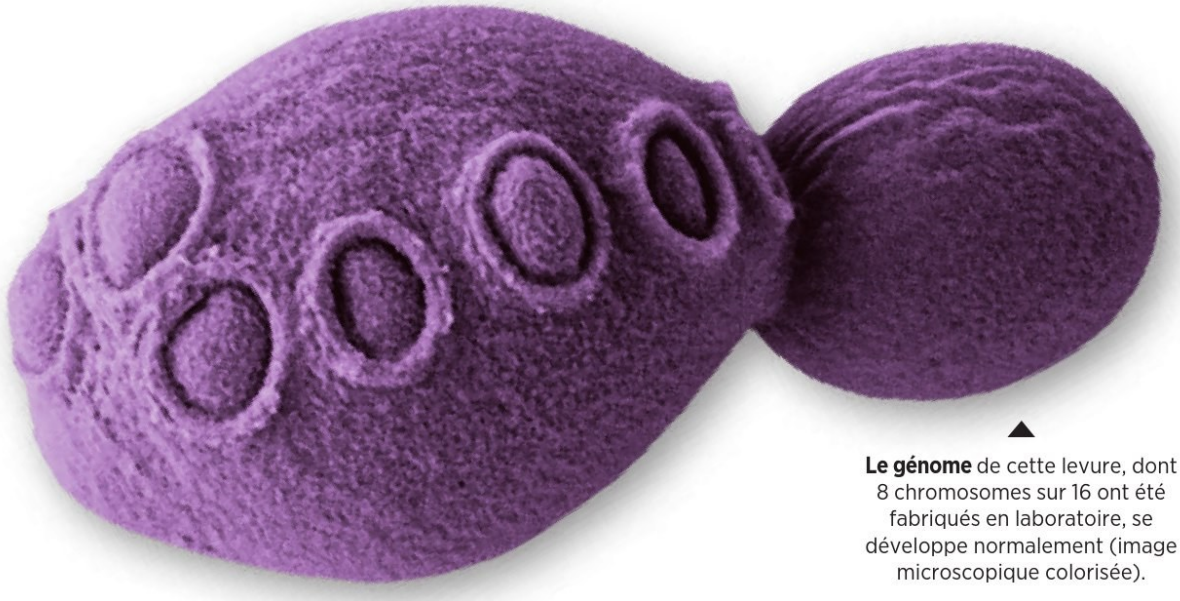
« Difficile à maîtriser, la peinture noire a donc souvent eu mauvaise réputation »

Pauline Hélou-de La Grandière, restauratrice du patrimoine, doctorante à CY Cergy Paris Université

Disparu en 2022, Pierre Soulages en fera pourtant un usage intensif, participant ainsi à sa « réhabilitation ». Qualifié dès 1949 de « peintre du noir », il formulera quantité de médiums composés de noir d'ivoire, noir de fumée, noir de Mars, brou de noix, etc. *« Nous les analysons depuis quelques années en détail afin de mieux comprendre l'évolution et l'intention artistiques de Pierre Soulages et à des fins de restauration »*, expose Pauline Hélou-de La Grandière. Mais ces travaux visent aussi à caractériser les effets visuels engendrés par certaines structures (bordures d'empâtements, sillons), des surfaces granuleuses et diffuses ou, au contraire, planes et réfléchissantes de sa peinture. *« Selon la position de l'observateur apparaissent ainsi des jeux d'ombre, une variété de reflets, et paradoxalement des noirs très lumineux »*, relate Mathieu Thoury. Soit diverses tonalités à partir d'un même pigment ! Pierre Soulages l'affirmait d'ailleurs en 2007 : le « grand noir », le noir absolu, ne peut être atteint car il n'existe pas. ■

Le premier eucaryote de synthèse

Un consortium international de biologistes est parvenu à créer une levure avec de l'ADN synthétique. Plus de la moitié de son matériel génétique a été conçu dans une éprouvette avant d'être insérée dans la cellule.



Le génome de cette levure, dont 8 chromosomes sur 16 ont été fabriqués en laboratoire, se développe normalement (image microscopique colorisée).

ZHAO ET AL./CELL

Les biotechnologies sont-elles à l'aube d'une nouvelle ère ? C'est ce que laisse présager une petite levure à bière, de type *Saccharomyces cerevisiae*. Elle n'a rien d'extraordinaire en apparence, mais se distingue de ses congénères par son ADN synthétique. En effet, plus de la moitié de son génome, soit huit chromosomes sur 16, a été réécrite par ordinateur et fabriquée en laboratoire par synthèse chimique. Une prouesse réalisée par un consortium international appelé Yeast Sc2.0 (levure Sc2.0 en français) et dirigé par le généticien américain Jef Boeke, fondateur de l'Institut des systèmes génétiques au centre médical Langone de l'université de New York (États-Unis). Certes, une bactérie entièrement équipée d'ADN synthétique avait déjà été produite en 2010. Mais faire une telle manipulation sur une levure — un champignon unicellulaire —, c'est monter d'un étage en matière de complexité.

Il s'agit en effet de s'attaquer à une cellule eucaryote, du même type que celles qui composent les plantes, les animaux et donc les cellules humaines. Les bactéries, elles, des cellules procaryotes, dont l'architecture est plus simple — sans noyau notamment. *« Passer d'une bactérie à une levure, c'est un progrès majeur »*, assure Rahmi Lale, qui dirige un laboratoire consacré à la biologie synthétique à l'université norvégienne de sciences et de

technologie et qui n'a pas contribué à ces travaux. « *Le génome de la levure est beaucoup plus grand et plus répétitif que les génomes bactériens. Il est aussi constitué de nombreux chromosomes alors que la plupart des bactéries n'en ont qu'un seul* », précise Jef Boeke. Sa levure synthétique pourrait même ringardiser les célèbres ciseaux moléculaires CRISPR-Cas9. Cette technologie nobélisée en 2020 a pourtant révolutionné la biologie moléculaire depuis sa mise au point en 2012, en rendant possibles des modifications très précises dans le génome. Mais la technique de l'ADN synthétique exploitée par le consortium Yeast Sc2.0 agit à bien plus grande échelle, sur de grosses portions de génome. CRISPR est un outil de précision, comme un tournevis pour changer une lampe, alors que l'ADN synthétique permet de faire du gros œuvre facilement, comme déplacer un mur. Pour Patrick Cai, spécialiste de génomique synthétique à l'université de Manchester (Royaume-Uni) et coordinateur du projet, « *il s'agit d'une étape formidable pour l'ingénierie biologique. Si nous sommes capables d'éditer des gènes depuis un certain temps, nous n'avions encore jamais pu écrire un génome d'eucaryote à partir de rien.* »

On sait produire de l'ADN de manière totalement chimique depuis les années 1960, mais à un coût exorbitant. Comptez plus de 500 euros pour un fragment de 3000 bases, soit 3000 lettres A, T, C ou G. Cela semble accessible ? C'est une fausse impression. D'abord, au-delà de 3000 bases par fragment, les prix sont encore bien plus élevés. On ne maîtrise aujourd'hui que la synthèse de petits morceaux. Surtout, un seul gène mesure en moyenne 27 000 bases chez les eucaryotes. Le génome de notre petite levure *S. cerevisiae* contient 12 millions de bases. Un océan à l'échelle de la synthèse ADN.

Remplacer morceau par morceau le génome natif

C'est pour cela que le consortium Yeast Sc2.0 s'est inspiré du bateau du héros grec Thésée. Plutarque raconte qu'afin de l'honorer, les Athéniens ont conservé son navire pendant des siècles. Pour le protéger de l'usure, « *ils en ôtaient les vieilles pièces à mesure qu'elles se gâtaient, et les remplaçaient par des neuves qu'ils joignaient solidement aux anciennes* ». Pour le philosophe grec, c'était une métaphore pour interroger la notion d'identité. Pour les biologistes, c'est une stratégie pour remplacer progressivement tout l'ADN de leur levure préférée. Les chercheurs ont ainsi remplacé, morceau par morceau, le génome natif de la levure par de l'ADN conçu en laboratoire. Ils se sont réparti la tâche et huit groupes, dans sept pays, ont produit les nouveaux chromosomes l'un après l'autre. Ceux-ci sont tous prêts désormais, mais seuls huit ont pour l'instant été regroupés dans la même cellule.

Plutôt que de tout recopier à l'identique, les biologistes ont en effet décidé de réécrire en partie cet ADN. Tout d'abord, ils ont fait un important ménage génomique. Ils ont supprimé de grands morceaux de séquence ne codant pas directement les gènes. Ils ont aussi modifié les extrémités des chromosomes. Ces changements visent à réduire l'instabilité du génome, c'est-à-dire à supprimer des séquences plus propices aux mutations, parce que difficiles à recopier lors de la division cellulaire ou à l'intersection de plusieurs processus, et donc à risque d'accrochages entre les machineries cellulaires. Mais ce que les biologistes appellent instabilité est aussi une source de créativité du vivant. Ces « erreurs », ces accidents sont à la base des processus évolutifs. Lorsqu'ils apportent quelque chose, ils sont conservés au fil des divisions cellulaires. En réduisant l'instabilité, les chercheurs accroissent ainsi leur contrôle sur la levure et réduisent sa compétence évolutive. D'un être vivant, ils font un outil.

Un système de réarrangement des chromosomes

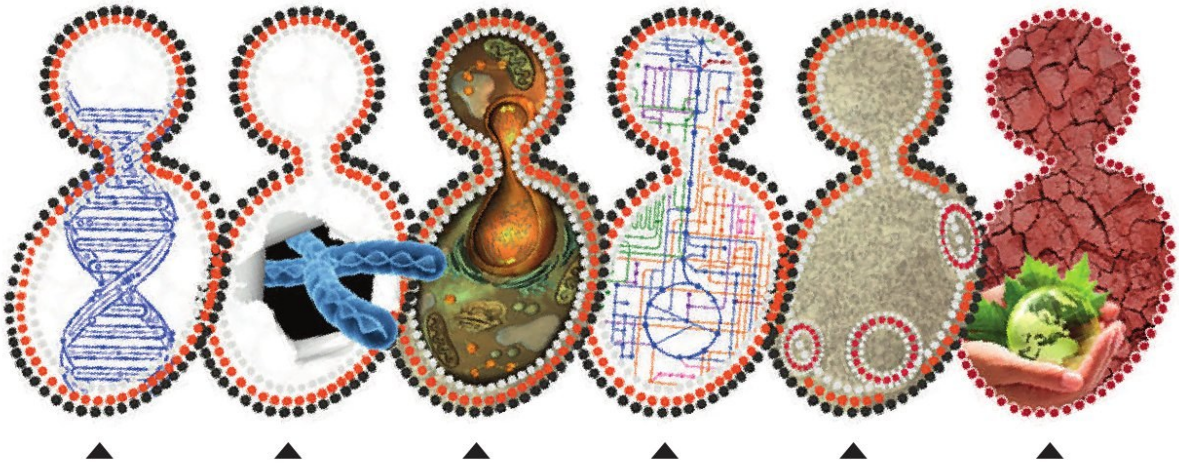
C'est encore plus flagrant quand on regarde la dernière grande modification introduite. Les scientifiques ont inséré dans le génome des points dits de réarrangements inductibles. Il s'agit

RECHERCHE

La France déjà en retard ?

Dix-huit ans, plus de 250 chercheurs, c'est ce qu'il aura fallu au consortium Yeast Sc2.0 pour réaliser 16 chromosomes de levure en ADN synthétique. Ces années de travail n'ont pas été vaines. Elles ont donné aux équipes une vraie avance sur le reste du monde scientifique. « *Au début du projet, le travail ne semblait pas super intéressant. Mais il a permis d'acquérir des compétences pour le design et l'utilisation de l'ADN de synthèse* », explique Romain Koszul, de l'Institut Pasteur, qui aurait voulu accueillir la synthèse d'un des chromosomes en France mais a dû renoncer faute de financement. « *Ce projet sert de vitrine à des technologies en train d'émerger. Le Royaume-Uni, les États-Unis et Singapour l'ont compris très tôt et y ont investi. Aucun pays d'Europe continentale ne s'y est engagé à l'époque. Mais maintenant, ces recherches sont financées en France* ». Pourrons-nous rattraper ce faux départ ?

Un organisme synthétique qui pourrait séduire la recherche appliquée



I. PRETORIUS ET AL.

de séquences particulières qui s'ouvrent et ne se referment qu'en présence d'une enzyme spécifique. Ils fonctionnent un peu comme des boutons-pression disposés le long des chromosomes. Mais au lieu de se réattacher toujours au même morceau, leur nouvelle fixation dépend de l'organisation en 3 dimensions de l'ADN. Ils déplacent ainsi de grandes bandes d'ADN d'un bout à l'autre du génome. « *Ce système permet d'explorer des réarrangements chromosomiques qu'on ne savait pas produire auparavant. On pourrait l'utiliser pour introduire une voie métabolique d'une autre espèce, par exemple* », suggère Romain Koszul, un spécialiste de la régulation spatiale des génomes à l'Institut Pasteur, à Paris.

Dans une étude récente, le consortium Yeast Sc2.0 a d'ailleurs présenté une autre souche de levure, dont le génome avait été parsemé de 83 boutons-pression moléculaires. Ils montrent que les réarrangements induits modifient rapidement l'expression des gènes, l'organisation du génome dans l'espace et, *in fine,* la biologie de la levure. Ils ont ainsi observé qu'un réarrangement du chromosome numéro 3 améliore la tolérance de la levure à l'acide acétique, ce qui suggère que cette région est impliquée dans la réponse au stress chimique.

Parfois, les changements imposés par le groupe Sc2.0 ne posaient pas de problèmes, parfois la cellule cessait de fonctionner correctement. « *On contrôle mal les effets sur la régulation de ce qu'on réécrit,* explique Rahmi Lale. *C'est comme si on comprenait le langage du génome dans les grandes lignes, mais qu'on ne savait s'exprimer qu'en "parler bébé".* » Tester des changements et des reformulations de la séquence ADN permet d'éprouver les connaissances sur le fonctionnement d'un génome d'eucaryote, et d'améliorer notre niveau de langage génomique. Avant même d'être complète, cette cellule est donc déjà un outil pour la recherche fondamentale. « *Le prochain défi,* prédit Rahmi Lale, *ce sera d'utiliser des intelligences artificielles pour créer des phénotypes* », c'est-à-dire synthétiser des séquences dont les effets biologiques auront été prédits par un algorithme. « *C'est un formidable outil pour apprendre comment fonctionnent les génomes et leurs systèmes de régulation. Avec ça, on peut écrire ce qu'on veut* », résume-t-il. Et ensuite ? Le choix de *S. cerevisiae* n'est pas un hasard. Cette espèce de levure est déjà bien connue pour être utilisée dans de nombreux procédés industriels pour la fermentation alimentaire (bière, alcool, pain, chocolat…), la synthèse de bioéthanol ou de petites molécules destinées à la chimie. Ce n'est pas un pari risqué de penser qu'une souche « *malléable à façon* » boostera ses applications. « *C'est comme se poser sur la Lune. La vraie question désormais c'est : "Qu'est-ce qu'on fait avec ça ?"* », lance Rahmi Lale. ■ **Agnès Vernet**

NTNU

« Le prochain défi, ce sera d'utiliser des intelligences artificielles pour créer des phénotypes »

Rahmi Lale, université norvégienne de sciences et de technologie

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

L'IA générative, casse-tête de cybersécurité

L'engouement pour les outils de génération de contenus s'est vite accompagné de révélations sur leurs failles de sécurité. Ces technologies peuvent être détournées de leurs usages et leurs garde-fous contournés. Les cybercriminels s'en sont déjà emparés.

Avec un million d'utilisateurs en une semaine lors de son lancement à l'automne 2022, ChatGPT a enregistré un record d'adoption pour un service numérique. Problème : les cybercriminels se sont emparés tout aussi vite de cette technologie. C'était l'un des constats phares du panorama annuel de la cybercriminalité du Clusif, association professionnelle de spécialistes de sécurité informatique, présenté fin janvier. Des outils répliquant le fonctionnement de ChatGPT sont déjà en service, comme WormGPT (développé à partir du modèle du langage *open source* GPT-J) et FraudGPT, qui génèrent des messages d'hameçonnage (*phishing*) de très haute qualité, du code malveillant, de fausses identités bancaires. Par ailleurs, de nombreuses recherches et tests ont montré combien il était possible de manipuler et détourner de leurs usages les services grand public d'OpenAI, Google, Meta et d'autres.

Dans un article publié fin 2023, une équipe de Google DeepMind explique ainsi avoir amené des modèles de langage à révéler des données d'entraînement. Avec ChatGPT, les chercheurs ont procédé en lui demandant de répéter éternellement un mot. Au bout d'un moment, le

POUR EN SAVOIR PLUS

Typologie des attaques des systèmes d'IA selon le laboratoire d'innovations numériques de la Cnil : **sciav.fr/927attaques**

FORTINET

> « Si les données d'apprentissage sont fausses ou biaisées, elles vont ressortir dans les résultats fournis par l'algorithme »
> **Christophe Auberger,** directeur technique de Fortinet

chatbot « diverge » et livre des contenus qui n'auraient jamais dû sortir : données personnelles, contenus explicites, extraits de romans ou poèmes complets, articles scientifiques, etc. « *On voit bien que dans des contextes d'entreprises ou de chatbots spécifiques, cela peut poser problème* », notait Gérôme Billois, expert cybersécurité chez Wavestone, lors de son intervention pour le Clusif.

Autre faille : les captchas. ChatGPT est paramétré pour ne pas déchiffrer ces énigmes visuelles censées distinguer un humain d'un robot sur Internet. Or, en octobre, un usager de X (ex-Twitter) a envoyé l'image d'un captcha présentée sur un médaillon à BingChat (ChatGPT intégré dans le moteur de recherche de Microsoft). Il a expliqué au bot qu'il s'agissait d'un message secret de sa grand-mère décédée et qu'il avait besoin de le déchiffrer. Et l'IA a donné la réponse.

Entre 300 et 20000 dollars

c'est le prix auquel se monnaie en mai 2023 une minute de vidéo générée par IA (*deepfake*) sur le darknet (Web clandestin), en fonction de la qualité demandée, selon l'éditeur d'antivirus Kaspersky.

Un chercheur de la société de sécurité informatique Forcepoint a, lui, fait générer par le chatbot d'OpenAI plusieurs petits bouts de code avec des prompts (requêtes) séparés, présentés tantôt comme des travaux de recherche, tantôt comme une aide à un ami. Après quoi, il les lui a fait assembler, sans rien faire lui-même. Le résultat est un programme malveillant qui analyse des fichiers sur un ordinateur, les cache dans des images et les exfiltre. « *Aujourd'hui, les systèmes de cybersécurité qui pourraient essayer d'analyser ce genre de choses n'y sont pas préparés* », prévient encore Gérôme Billois. Plus technique, l'« empoisonnement » consiste à glisser de mauvaises données dans le corpus d'entraînement d'un algorithme. « *Ces systèmes n'arrêtent pas d'apprendre,* explique Christophe Auberger, directeur technique de la société de cybersécurité Fortinet. *Par l'intermédiaire de plug-in* [petit programme intégré au programme principal], *on leur injecte de nouvelles données pour les optimiser sur tel ou tel domaine. Si ces données sont fausses ou biaisées, elles vont ressortir dans les résultats fournis par l'algorithme.* » Or, dans des contextes d'entreprise, ces outils s'intègrent à toute une chaîne logicielle. Les résultats d'une IA générative vont être directement transférés à un autre outil qui va s'en servir pour produire un autre résultat, une autre décision, et ainsi de suite. Un « empoisonnement » peut avoir des effets nuisibles en cascade tout en étant difficile à repérer dans l'ensemble d'un processus.

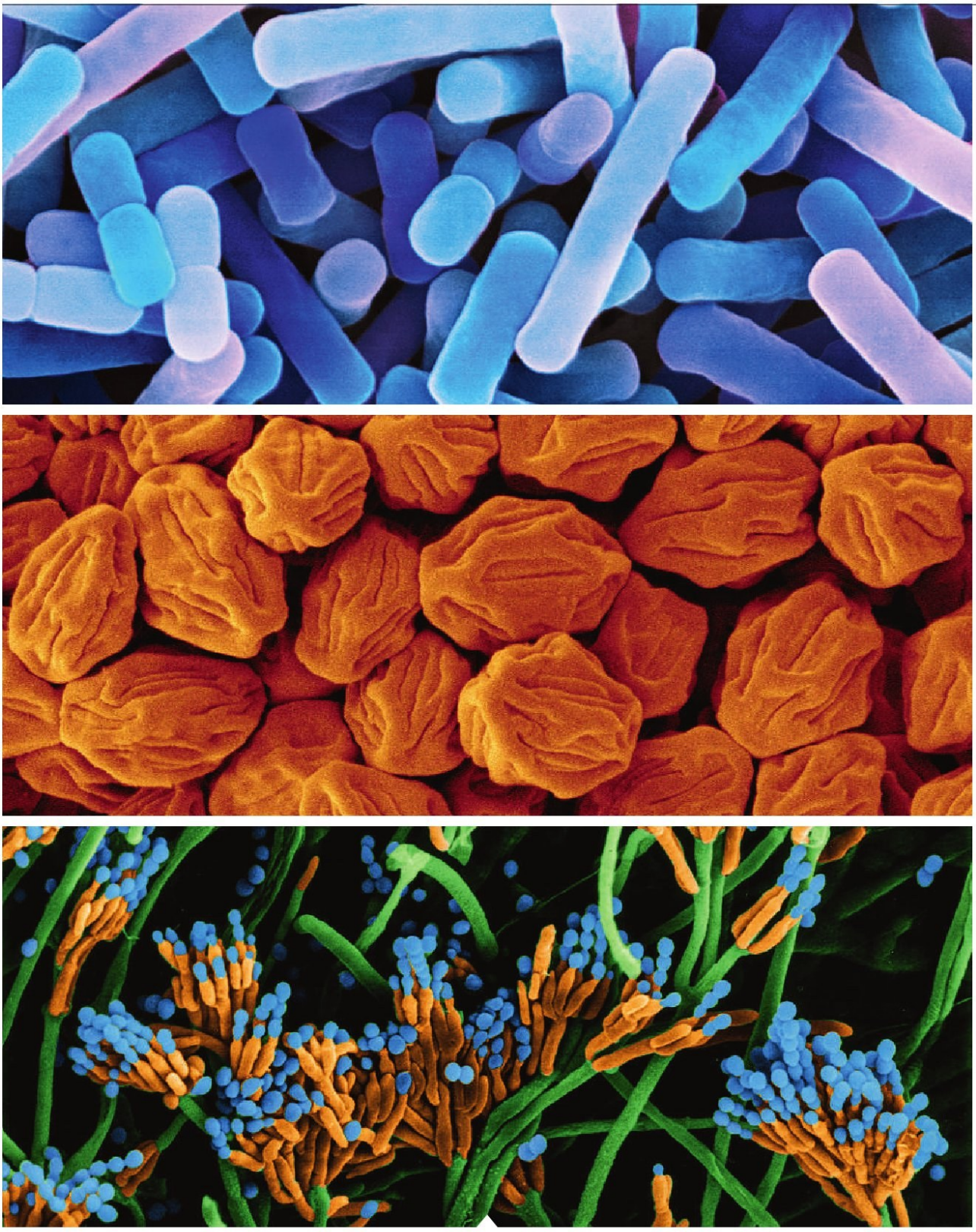
Définir un cadre de responsabilité de l'IA

Bien sûr, les développeurs de modèles reparamètrent régulièrement leurs outils au fur et à mesure que des possibilités d'attaque sont signalées. Mais la tâche est complexe. « *Il y a un aspect de pure cybersécurité, mais on touche aussi à la notion d'IA responsable, qui consiste à mettre les moyens pour que le système ne sorte pas d'un certain cadre,* explique Christophe Auberger. *C'est d'autant plus difficile à faire que le système est très généraliste.* » À cela s'ajoute un facteur typique de ces technologies : une confiance presque aveugle en des outils fascinants. En cybersécurité, c'est connu, la faille principale est souvent humaine. ■ **Arnaud Devillard**

LE MOT DU MOIS

Deepfake

Traduit en français par « hypertrucage », le *deepfake* est l'usage malveillant le plus connu de l'IA. Il consiste à générer du faux contenu (image fixe, vidéo, son) avec des technologies d'apprentissage profond. Les *deepfakes* sont apparus en 2014, avant ChatGPT ou Dall-E 2, à la suite de l'invention des réseaux génératifs antagonistes à l'université de Montréal (Canada). Ils servent le plus souvent à remplacer le visage d'une personne par celui d'une autre sur une vidéo. En janvier, un employé de multinationale à Hongkong a été invité à une visioconférence par des collègues. Il a reçu pour instruction de procéder à 15 virements bancaires pour un total de 26 millions de dollars. C'était une escroquerie : la réunion était une séquence préenregistrée et les « collègues » étaient des *deepfakes* fabriqués par des cybercriminels à partir de vidéos publiques disponibles.



DENNIS KUNKEL MICROSCOPY/SPL/SUCRE SALÉ

« Lactobacillus bulgaricus » est une des deux bactéries utilisées pour la confection des yaourts (en haut). Le champignon microscopique **« Rhizopus oryzae »** sert notamment à la fabrication de boissons fermentées (au centre). **« Penicillium roqueforti »** est une moisissure caractéristique des fromages de la famille des bleus, qui contribue à leurs texture et flaveur (en bas).

Ferments

Ils vont révolutionner la nourriture du futur

PLAINPICTURE

En consommation croissante, les produits fermentés constituent désormais une sérieuse solution de transition vers une alimentation moins carnée et moins sucrée. Un nouveau centre de recherche en région parisienne va explorer ce monde encore méconnu des bactéries, levures et champignons.

Par Loïc Chauveau

Pain, vin, bière. Ces trois produits phares naissent de l'action de la levure de boulanger (ou levure de bière), *Saccharomyces cerevisiae*. « *Ce champignon unicellulaire a la redoutable caractéristique d'aimer beaucoup le sucre qu'il transforme en alcool et acide. Conséquence : les bactéries pathogènes ne peuvent plus se développer, ce qui permet de conserver naturellement la nourriture* », expose Romain Jeantet, directeur des études à l'Institut Agro Rennes-Angers et membre du comité exécutif de la plateforme de recherche Ferments du futur. Voilà au moins 15 000 ans que la fermentation est ainsi une clé de la conservation des aliments. Les premières traces de pain issu de céréales fermentées remontent à 14 400 ans dans l'actuelle Jordanie, soit 5000 ans avant l'invention de l'agriculture. Le vin le plus ancien a au moins 8000 ans (en Géorgie) et la première bière 5000 ans (en Mésopotamie). Aujourd'hui, la part des produits fermentés varie dans le monde de 5 à 40 % du régime alimentaire. Les Asiatiques sont les plus gros consommateurs tandis qu'en Afrique, la fermentation est l'élément clé pour assurer la sécurité alimentaire.

En septembre prochain, six établissements de recherche, 24 entreprises privées et huit organisations professionnelles couperont le ruban ▸

inaugural de Ferments du futur. Ces nouveaux bâtiments, installés sur le plateau de Saclay (Essonne), abriteront tout l'appareillage scientifique nécessaire pour explorer le monde grouillant des bactéries, levures et champignons filamenteux que nous ingérons tous les jours dans les aliments fermentés. Cette mobilisation générale entre public et privé, recherche fondamentale et agro-industrie — financée à hauteur de 48,3 millions d'euros par le programme gouvernemental France 2030 —, vise à mieux connaître ces micro-organismes et à en découvrir de nouveaux pour élargir la gamme des végétaux susceptibles d'être ainsi conservés… tout en restant appétissants ! De quoi favoriser le changement de régime qui attend l'humanité au cours de ce siècle : plus de légumes, moins de viande.

Des moisissures utiles contre le développement de bactéries

Ferments du futur est un nouvel épisode d'une histoire qui s'enfonce réellement dans la nuit des temps. L'humain a toujours cohabité avec des voisins invisibles, bactéries, levures et champignons colonisant son environnement proche et même ses intestins. En moyenne, chaque mètre cube d'air recèle ainsi 20 000 spores de champignons microscopiques qui n'attendent qu'un substrat favorable pour s'y poser et s'y développer, ainsi que l'a découvert Louis Pasteur en 1857. Certaines de ces moisissures sont très utiles parce qu'elles développent un goût et un arôme qui transcendent l'aliment. « *Mais elles sont aussi nécessaires pour empêcher le développement de bactéries comme les* Listeria, *responsables des listérioses, et les salmonelles qui provoquent des toxi-infections alimentaires graves* », assure Romain Jeantet.

La fermentation se conjugue en fait au pluriel, car il en existe plusieurs types : alcoolique, due au travail des levures sur le jus de raisin pour faire le vin, ou sur la farine pour faire le pain ; acétique, transformant le vin en vinaigre ; lactique, qui change le lait en fromage ou en yaourt et le chou en choucroute ; ou encore propionique, permettant d'obtenir les fromages à pâte cuite, où les bulles de CO_2 émises par le procédé dessinent les fameux trous de l'emmental. À partir de cette base chimique, une infinité de combinaisons existe. La biodiversité des principaux organismes utilisés est immense, chaque famille, chaque éleveur faisant son fromage, le plus petit charcutier possédant ses propres micro-organismes conservés et multipliés, mais aussi simplement présents dans l'atmosphère d'une cave ou d'un cellier. En cette période d'avant les réfrigérateurs et les congélateurs, où règne aussi le « fait maison », la fermentation devient un pilier de l'alimentation dans le monde entier. Car la technique est simple, même si des accidents ont parfois eu lieu, avec des indigestions affectant une famille ou une bourgade.

Ce n'est vraiment qu'après la Seconde Guerre mondiale que l'industrialisation des produits fermentés s'impose. L'exode rural s'accélère et le mode de vie urbain est adopté, de gré ou de force. Dans les années 1960, l'industrie agroalimentaire prend le relais de la cuisine familiale. « *Dès lors, les enjeux sont de tout autre nature,* note Florence Valence, responsable du Centre international de ressources microbiennes dédié aux bactéries d'intérêt alimentaire (Cirm-Bia). *Il faut désormais avoir des souches stables qui procurent le même goût et la même texture pour des aliments produits par milliers de tonnes, et écarter tout incident avec un pathogène qui peut avoir des conséquences graves pour de très nombreux consommateurs.* » Le réflexe de l'industriel est donc d'uniformiser. Il est en effet très simple de cultiver à l'infini la même souche, qui assure un goût et un arôme stables. Avec des normes parfois drastiques, issues de l'histoire même du produit. Ainsi, selon la réglementation en vigueur, le yaourt doit être exclusivement issu de deux bactéries, *Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*. Tous les autres produits laitiers fermentés n'utilisant pas ces deux espèces ne peuvent être appelés yaourts.

E. BEAUMONT/INRAE

« Nous avons une collection de 4000 souches de bactéries d'intérêt alimentaire. On les tient à la disposition des industriels »

Florence Valence, responsable du Centre international de ressources microbiennes dédié aux bactéries d'intérêt alimentaire (Cirm-Bia)

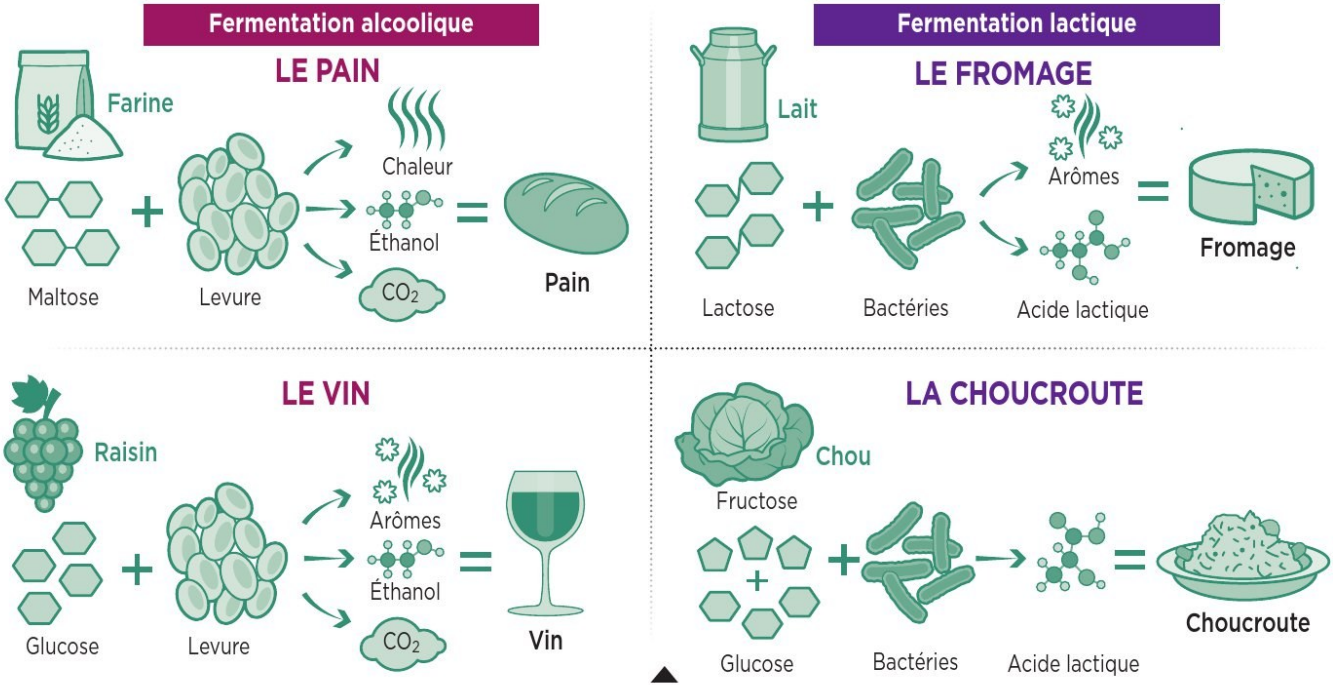
ÉVOLUTION

Des aliments fermentés pour un plus gros cerveau

Sans les ferments, *Homo sapiens* n'aurait peut-être pas émergé. C'est la thèse développée en novembre 2023 dans la revue *Communications Biology* par Katherine Bryant de l'université d'Aix-Marseille avec Christi Hansen et Erin Hecht de l'université Harvard (États-Unis). Ces chercheurs émettent l'idée que le triplement du volume du cerveau humain au cours des deux derniers millions d'années n'est pas seulement dû à l'utilisation du feu permettant une meilleure digestion des protéines animales, mais à la fermentation des aliments. En les assimilant mieux, les humains ont réduit la dépense énergétique de la digestion qui s'est ainsi consacrée à l'accroissement du cerveau. La fermentation aurait permis aux humains de bénéficier de sources de protéines plus riches et disponibles sur des périodes plus longues, notamment hivernales.

PROCESSUS

Les deux principaux types de fermentation



Grâce à l'action de micro-organismes, comme la levure ou des bactéries, les sucres (maltose, lactose, glucose, fructose) sont transformés en acide lactique ou en éthanol. Cette réaction libère également d'autres composés tels que des arômes ou du CO_2.

BRUNO BOURGEOIS

Le risque de cette démarche est d'appauvrir la biodiversité de ces micro-organismes. À l'instar de tous les êtres vivants, les bactéries et champignons d'une même espèce n'ont pas un patrimoine génétique identique. Or, cette biodiversité est un atout pour éviter que les souches ne périclitent génétiquement. C'est pour n'avoir utilisé qu'une seule souche de *Penicillium camemberti*, le champignon qui assure au camembert une belle croûte blanche (le cœur de ce fromage est fourni par le travail de bactéries), que l'appellation se retrouve aujourd'hui avec un seul type d'individu qui perd la faculté de se reproduire sexuellement. Afin d'éviter ce genre d'impasse, de très nombreux techniciens vont de par le monde à la recherche d'individus performants, voire de nouvelles espèces. « *Notre travail, c'est d'aller rechercher des micro-organismes dans l'environnement, de les reconnaître pour en tester leur éventuelle capacité à fournir un goût et un arôme qui plaisent,* décrit ainsi Patrice Laforce, directeur recherche et développement chez le producteur de ferments Lallemand Cultures de spécialité. *Notre portefeuille d'organismes de culture du fromage contient par exemple des levures désacidifiantes et aromatisantes, d'autres qui se comportent comme des moisissures pour créer une croûte améliorant le goût du fromage, des* Penicillium *produisant une croûte fleurie, des bactéries qui contribuent à la texture et à la flaveur du fromage, etc.* »

Les citoyens sont invités à faire étudier leur production

Voilà pourquoi les cinq collections de micro-organismes du Cirm de France existent : leur rôle est de collecter des souches diverses de bactéries, de levures et de champignons filamenteux pour enrichir ainsi les collections, alors qu'un industriel ne s'intéressera qu'à l'amélioration des souches existantes. La collection de Rennes, que gère Florence Valence, est cependant la seule à conserver des bactéries d'intérêt alimentaire. « *Nous avons une collection de 4000 souches que nous sommes allés chercher dans l'environnement. Nous avons décrit leur intérêt alimentaire et nous les conservons à -80 °C. On les tient à la disposition des industriels* », détaille la chercheuse devant des congélateurs entassés dans une pièce obscure hautement sécurisée. C'est que se trouve peut-être dans cette collection le microbe qui fera le succès gustatif de demain. « *On s'intéresse à des fonctionnalités comme la production de composés d'arômes, l'activité probiotique, la fabrication de la texture ainsi que* ▶

ÉTUDE

Une santé intestinale préservée

Les produits fermentés sont bons pour la santé, affirment de plus en plus d'enquêtes épidémiologiques. La dernière en date, une étude d'avril 2023, porte sur une cohorte de plus de 46 000 adultes américains, suivis entre 2001 et 2018 et séparés en trois catégories selon l'ingestion plus ou moins forte de produits fermentés. Elle démontre que les plus gros consommateurs présentaient une plus faible pression artérielle, un indice de masse corporelle moins élevé et un meilleur taux d'insuline dans le sang. Mais levures et bactéries pourraient-elles aussi soigner ? Une première preuve mondiale vient d'être apportée par l'Inrae de Jouy-en-Josas. Cinq levures largement utilisées depuis très longtemps par l'industrie ont été injectées à des souris modèles dont le système digestif avait été préalablement perturbé par une inflammation. Cette méthode a permis de déterminer une réaction du microbiote à deux levures industrielles, *Cyberlindnera jadinii* et *Kluyveromyces lactis*, des champignons que l'on retrouvera essentiellement pour la production d'arômes dans les fromages comme le brie ou le pecorino. L'équipe a pu montrer que *C. jadinii* modifiait les populations du microbiote en faveur d'une population bactérienne aux fonctions positives pour l'intestin. Conclusion provisoire et prudente : ces deux souches ont un potentiel pour combattre l'inflammation intestinale.

la capacité des bactéries à se développer dans certaines conditions d'acidité pour répondre à des besoins de procédés alimentaires particuliers », explique Florence Valence. Tous les moyens sont bons pour découvrir de nouvelles variétés. Le projet scientifique Flegme a ainsi sollicité 250 citoyens faisant fermenter leurs légumes pour qu'ils donnent à étudier des échantillons de leur production afin d'isoler leurs souches d'intérêt. Les chercheurs ont ainsi trouvé une diversité très importante de bactéries lactiques et… aucun pathogène !

Cette sauvegarde de la biodiversité microbienne et fongique sera l'une des tâches de Ferments du futur. Le nouveau laboratoire va concentrer tous les outils de séquençage à haut débit, de systèmes de microfermentation contrôlée, de chimie analytique et d'intelligence artificielle. Il pourra ainsi caractériser de nouvelles espèces et déterminer les variations individuelles entre ces micro-organismes afin d'orienter les recherches. *« Tout ce matériel coûte très cher et le secteur de l'agroalimentaire n'a pas les compétences scientifiques pour mener ces travaux,* précise Sylvie Binda, vice-présidente recherche et développement chez le producteur de levures Lallemand Solutions santé et représentante du secteur privé au sein de Ferments du futur. *La mise en commun des programmes va nous faire gagner énormément de temps.* »

CIRM-BIA

Collectées dans l'environnement par les chercheurs, les souches de bactéries d'intérêt alimentaire sont conservées à -80 °C par le Cirm de Rennes.

Si une alliance public-privé a été montée sous l'égide des pouvoirs publics, c'est que les enjeux dépassent les intérêts des seuls industriels. On prédit en effet aux produits fermentés un rôle essentiel dans l'amélioration de la santé publique mondiale *(lire l'encadré ci-contre)* et dans la lutte contre le changement climatique. Selon un rapport du bureau d'études canadien Emergen Research, le marché mondial des produits alimentaires fermentés devrait bondir de 520 milliards d'euros en 2019 à plus de 800 milliards en 2027 — poussé il est vrai par la bière, produit phare du secteur des boissons fermentées qui représente au total 40 % de ce marché. Cette croissance trahit un début de changement de régime alimentaire.

Élargir la gamme des légumes et légumineuses fermentés

Les produits à base de végétaux fermentés (viande végétale, substitut au soja des produits laitiers, etc.) connaissent de fortes croissances partout en Europe et des boissons comme le kéfir ou le kombucha représentent désormais des alternatives crédibles aux sodas. *« C'est cette transition vers un régime moins carné, moins sucré que nous devons accompagner en proposant plus de solutions, notamment en élargissant la gamme des légumes et légumineuses fermentés et en approfondissant les recherches sur des bactéries et levures qui produisent des arômes et des goûts aptes à séduire les consommateurs et à les inciter à changer de diète* », plaide Romain Jeantet.

Sur le plateau de Saclay, à proximité de l'Institut national de la recherche agronomique (Inrae) et de l'école AgroParisTech, les chercheurs de Ferments du futur ambitionnent de faire retrouver aux consommateurs français et européens d'anciennes recettes de cuisine remises au goût du jour par les technologies de pointe. C'est dans les vieux pots… ■

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

L'expédition dans les monts Cyclope (Indonésie), menée par des biologistes de l'université d'Oxford (Royaume-Uni) en 2023, a permis de retrouver l'échidné à nez long d'Attenborough, porté disparu depuis 1961. Le mammifère a pu être filmé grâce à des pièges photographiques.

À la recherche des espèces perdues

L'association Re:wild met en œuvre d'importants moyens pour retrouver des animaux et des plantes disparus dans la nature. Depuis le lancement de son programme en 2017, 12 espèces ont pu être localisées, notamment grâce à la recherche d'ADN environnemental ou à la pose de pièges photographiques.

Le mâle ophrysie de l'Himalaya a des pattes et le bec rouges, une gorge et une face noires et un front blanc. C'est à cette description, établie pour la première fois par le zoologiste britannique John Edward Gray en 1846, que les scientifiques indiens de la Nature Conservation Foundation vont se référer pour retrouver cet oiseau qui n'a plus été vu depuis 1876 en Inde. Près de 150 ans après, la tâche peut paraître ardue. Pourtant, plusieurs exemples récents démontrent que la mission n'est pas impossible. Et l'association Re:wild le prouve régulièrement. Fondée par un groupe international de scientifiques et l'acteur américain Leonardo DiCaprio, elle dresse et met à jour depuis 2017 une liste des « espèces perdues les plus recherchées ». Elle en compte 25, de tous taxons, zones géographiques et habitats, disparues depuis au moins dix ans dans la nature, sans population en captivité, et piochées dans un inventaire de plus de 2200 espèces. « *Il est important de se concentrer sur la redécouverte de celles perdues afin de lever toute incertitude quant à leur état de conservation et de mettre en œuvre une protection avant qu'il ne soit trop tard* », explique Christina Biggs, responsable des espèces perdues chez Re:wild.

EXPEDITION CYCLOPS

Chaque individu contribue à maintenir l'équilibre de la nature

La nature repose en effet sur un équilibre fragile et chaque individu qui y prend place contribue à le maintenir. Même une espèce qui n'est pas la clé de voûte de son écosystème peut en soutenir une. « *Et une fois que l'une d'elles disparaît, l'autre s'effondre, puis le système tout entier s'écroule* », prévient la biologiste. « *L'effet psychologique est aussi très important,* estime Frank Glaw, qui officie à la Collection zoologique d'État de Munich, en Allemagne. *Les médias nous annoncent chaque jour beaucoup de mauvaises nouvelles et très peu de positives, notamment en ce qui concerne l'environnement. Les redécouvertes d'espèces perdues peuvent donc nous redonner un peu d'espoir.* »

Justement, la liste de Re:wild facilite la communication auprès du grand public. S'y trouvent des espèces pouvant être protégées par des mesures bien définies si elles venaient à être retrouvées, et porteuses d'une histoire susceptible d'attirer l'attention. C'est le cas de l'échidné à nez long d'Attenborough, disparu depuis les années 1960, qui est l'une des cinq espèces de mammifère qui pond (dits mammifères monotrèmes). De quoi titiller la curiosité du public donc, mais aussi de quelques spécialistes que Re:wild a soutenus en 2023 pour qu'ils débusquent le précieux organisme *(lire l'encadré p. 60)*. Ces quêtes ne concernent pas exclusivement les espèces animales. Par exemple, le mystérieux ilex de Pernambouc, arbre endémique du Brésil, qui n'est connu que grâce à un échantillon collecté dans un endroit non précisé dans la forêt atlantique, était perdu depuis 1838 avant sa redécouverte en 2023 *(lire l'encadré p. 61)*.

Après avoir sélectionné une espèce perdue, l'organisation va estimer un budget et obtenir les fonds nécessaires à sa recherche grâce à des dons de particuliers, des parrainages d'entreprises et des subventions de gouvernements et d'ONG. Ensuite, elle contacte son réseau afin de trouver des partenaires locaux (chercheurs, mais aussi peuples autochtones, communautés, dirigeants…) et surtout l'Union internationale pour la conservation de la nature, dotés de l'expertise nécessaire. Un plan d'action est mis en place afin de maximiser les chances de réussite : matériel, coordination avec les gouvernements locaux, modalités du voyage, sécurité sur place, tout est passé en revue. 14 recherches sont ainsi prévues pour cette année, dont celle de l'ophrysie de l'Himalaya.

Si Re:wild a professionnalisé la quête d'espèces perdues, des découvertes fortuites ont également lieu hors de ce cadre. En 2016, Andy Boyce, un écologue américain, a été surpris d'observer, au cours d'une étude de terrain en Malaisie, un petit-duc de Rajah sur l'île de Bornéo,

AFRIQUE DU SUD

La taupe dorée refait surface

La trace de la taupe dorée de De Winton *(Cryptochloris wintoni)* avait été perdue par la communauté scientifique depuis 1936. Alors qu'elle était endémique de Port Nolloth, dans l'ouest de l'Afrique du Sud, son existence dans la ville côtière a été bouleversée par l'exploitation des diamants alluviaux. Pour tenter de retrouver le furtif mammifère dont on sait qu'il vit normalement dans des terriers et qu'il est capable de « nager » dans le sable, les chercheurs ont utilisé l'ADN environnemental (ADNe). L'analyse d'échantillons a confirmé sa présence dans la zone d'étude en 2021 et des spécimens ont même été vus. En tout, cinq populations de taupes dorées de De Winton ont été repérées. Ces résultats *« suggèrent que cette espèce pourrait en fait être largement répandue, mais pas nécessairement abondante, et certainement moins dans les zones soumises aux activités minières, qui continuent de constituer une menace pour les espèces »*, soulignait une étude parue en novembre 2023 dans la revue *Biodiversity and Conservation*.

JP LE ROUX/ ENDANGERED WILDLIFE TRUST / AFP

EXPEDITION CYCLOPS

INDONÉSIE

Rencontre filmée avec l'échidné disparu

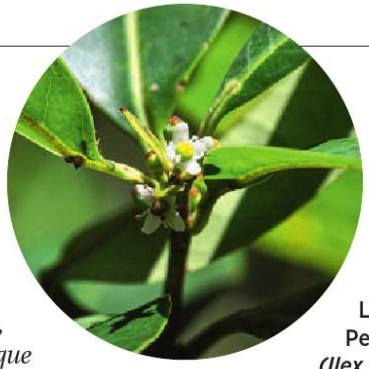
Une expédition scientifique menée en Indonésie, dans les monts Cyclope, a permis d'observer l'échidné à nez long d'Attenborough *(Zaglossus attenboroughi)*, perdu depuis 1961. Cette espèce monotrème avait alors été documentée par un certain Pieter van Royen, un botaniste néerlandais. Lors d'une expédition scientifique dont les résultats ont été dévoilés en 2023, l'échidné a pu être photographié et filmé pour la toute première fois grâce à l'installation de pas moins de 80 pièges photographiques. Il fallait cela pour repérer ce mammifère nocturne et fouisseur, dont le nom fait référence à l'écrivain et naturaliste britannique David Attenborough. Entre 1961 et cette redécouverte, des signes de sa présence avaient été rapportés par les villageois de Yongsu Sapari et lors de la pré-expédition. Des trous réalisés par le « nez » de l'animal — afin de trouver des invertébrés dans le sol — avaient notamment été relevés. Encore fallait-il documenter scientifiquement sa présence, ce qui est maintenant chose faite.

une sous-espèce d'oiseau qui n'avait pas été documentée vivante dans la nature depuis 1892. Afin de profiter au maximum de sa découverte, le chercheur a observé l'oiseau durant deux heures à plus de 1600 mètres d'altitude et l'a photographié. Mais le hibou ne sera plus aperçu les jours suivants, emportant avec lui toute information pouvant permettre sa protection.

L'ADN environnemental, une technique puissante

Il s'agit là de la difficulté de l'exercice : comment trouver et recueillir des données sur une espèce qui n'a plus été aperçue depuis des dizaines d'années et qui cultive l'art de la furtivité ? Malgré sa discrétion, toute espèce animale laisse derrière elle des traces ADN (cellules de peau, poils, urine ou sang…) comme un malfaiteur peu attentionné le ferait sur une scène de crime. C'est ainsi que la taupe dorée de De Winton a conduit une équipe de scientifiques jusqu'à elle *(lire l'encadré p. 59)*. Alors quand on lui demande si certaines nouvelles pratiques facilitent aujourd'hui la recherche d'espèces perdues, Eli Wyman, entomologiste à l'université de Princeton (États-Unis), désigne sans hésiter l'ADN environnemental (ADNe), le nom donné à l'analyse de ces traces. *« Il faut prélever des échantillons de l'environnement, éventuellement du sol, de l'eau ou même de l'air, puis amplifier d'infimes quantités d'ADN de l'espèce recherchée. Cette technique peut être très puissante pour localiser des populations d'animaux difficiles à trouver »*, explique celui qui, en 2019, a été au cœur de la redécouverte, dans l'archipel indonésien des Moluques, d'une espèce perdue depuis plus de trente ans, l'abeille de Wallace, la plus grande du monde.

Quand il ne permet pas de localiser le spécimen convoité, l'ADN peut au moins aider à mieux le situer sur un arbre phylogénétique, avec de potentielles surprises à la clé. *« Les méthodes modernes d'ADN*



FRED JORDÃO

BRÉSIL

En ville, les derniers survivants d'une espèce d'arbre

L'ilex de Pernambouc *(Ilex sapiiformis)*, un arbre qui peut atteindre 8 à 12 mètres de haut, a été recensé pour la première fois par le biologiste écossais George Gardner en 1838, pour ne plus être retrouvé ensuite. Mais en 2023, au bout de six jours de recherche dans une zone urbaine comptant près de six millions d'habitants, dans l'État de Pernambouc (Brésil), quatre individus de cette espèce, reconnaissable à ses petites fleurs blanches, ont été repérés. Ils pourraient bien être les derniers survivants de l'espèce, plaçant celle-ci juste au bord de l'extinction. Des mesures d'urgence sont donc envisagées afin de la préserver. Une équipe des jardins botaniques de Recife, la capitale de l'État, surveille les précieux rescapés, leur rendant visite chaque semaine en espérant récolter leurs graines afin de favoriser une germination. La protection de la fragile zone boisée où ils ont été découverts et le lancement d'un programme de reproduction en captivité sont également envisagés.

permettent d'obtenir celui de spécimens conservés depuis des siècles dans des musées d'histoire naturelle, et montrent parfois que certaines des espèces disparues n'ont jamais existé », remarque Frank Glaw. C'est le cas de la tortue *Pelusios seychellensis* supposément endémique de l'île de Mahé (Seychelles), dont les spécimens étiquetés appartenaient en réalité à une autre espèce !

Plus ordinaires mais très efficaces, les pièges photographiques sont aussi de précieux outils. Correctement positionnés, ils se déclenchent au passage d'un animal et les biologistes n'ont plus qu'à visionner les cartes mémoire en espérant y apercevoir la silhouette de l'espèce recherchée. Concernant les végétaux, les équipes peuvent désormais parcourir des herbiers en ligne grâce à la numérisation des spécimens, ce qui permet de recueillir de précieuses informations avant même de lancer l'expédition. Fondamentalement, photos et ADN constituent des preuves majeures de redécouverte.

Une collaboration avec les communautés locales

Mais « *les facteurs les plus importants pour redécouvrir une espèce restent les plus traditionnels : collecter toutes les informations connues et pertinentes, avoir une expédition de recherche bien préparée et… de la chance* », énumère Frank Glaw, qui a lui-même mis la main en 2018 sur le caméléon *Furcifer voeltzkowi*, vu pour la dernière fois en 1913 à Madagascar. Un avis partagé par Sergio Henriques, coordinateur de la conservation des invertébrés au zoo d'Indianapolis (États-Unis). « *La science de la conservation est inextricablement liée à l'expérience et à la grande résilience des biologistes de terrain, ainsi qu'aux fortes collaborations avec les communautés locales* », indique-t-il. Leurs membres peuvent activement aider les chercheurs ou les guider grâce à des savoirs ancestraux. « *C'est ainsi que nous avons pu trouver une espèce aussi rare et timide* », assure-t-il, évoquant sa redécouverte au Portugal de l'araignée *Nemesia berlandi*, introuvable durant 90 ans.

Lorsqu'une espèce est retrouvée, une autre est sélectionnée pour prendre sa place dans la liste de Re:wild. Depuis son lancement en 2017, 12 espèces ont pu être localisées. Mais des résultats avaient déjà été obtenus auparavant. Une étude publiée dans *Plos One* en 2011, concernant amphibiens, mammifères et oiseaux, relatait déjà qu'au cours « *des 122 dernières années, au moins 351 espèces ont été redécouvertes, la plupart se trouvant sous les tropiques* », avec un temps de disparition moyen de 61 ans. Une fois localisées, il convient de comprendre pourquoi elles ont disparu et si elles sont en danger, ce qu'une espèce « discrète » n'est pas forcément. Si c'est le cas, Re:wild peut travailler avec des partenaires locaux pour, par exemple, établir une nouvelle zone protégée ou appuyer la promulgation de lois dédiées à la protection de l'espèce.

Les redécouvertes viennent aussi nourrir la communauté scientifique avec des publications en bonne et due forme. « *C'est le moyen prédominant pour transmettre des informations au Système mondial d'information sur la biodiversité et à l'Union internationale pour la conservation de la nature,* confirme Christina Biggs. *Nous avons un dicton qui dit que vous ne pouvez pas protéger ce que vous ne connaissez pas. La description doit donc être partagée pour garantir la sauvegarde de l'espèce.* » Et afin que disparition ne rime pas avec extinction. ■

Anne-Sophie Tassart

« Pour redécouvrir une espèce, il faut collecter toutes les informations, avoir une expédition de recherche bien préparée… et de la chance »

Frank Glaw, responsable de l'herpétologie à la Collection zoologique d'État de Munich (Allemagne)

Six techniques innovantes pour apaiser la douleur

Jamais la prise en compte de la douleur chronique n'avait mobilisé autant de programmes de recherche. Les innovations technologiques peuvent bénéficier à de nombreuses personnes en souffrance. À l'exemple de l'électrostimulation de la peau qui brouille le message douloureux, du laser qui soulage les effets des chimiothérapies, de la stimulation magnétique qui perturbe l'activité des neurones, ou encore de l'injection de toxine botulique qui atténue la migraine chronique.

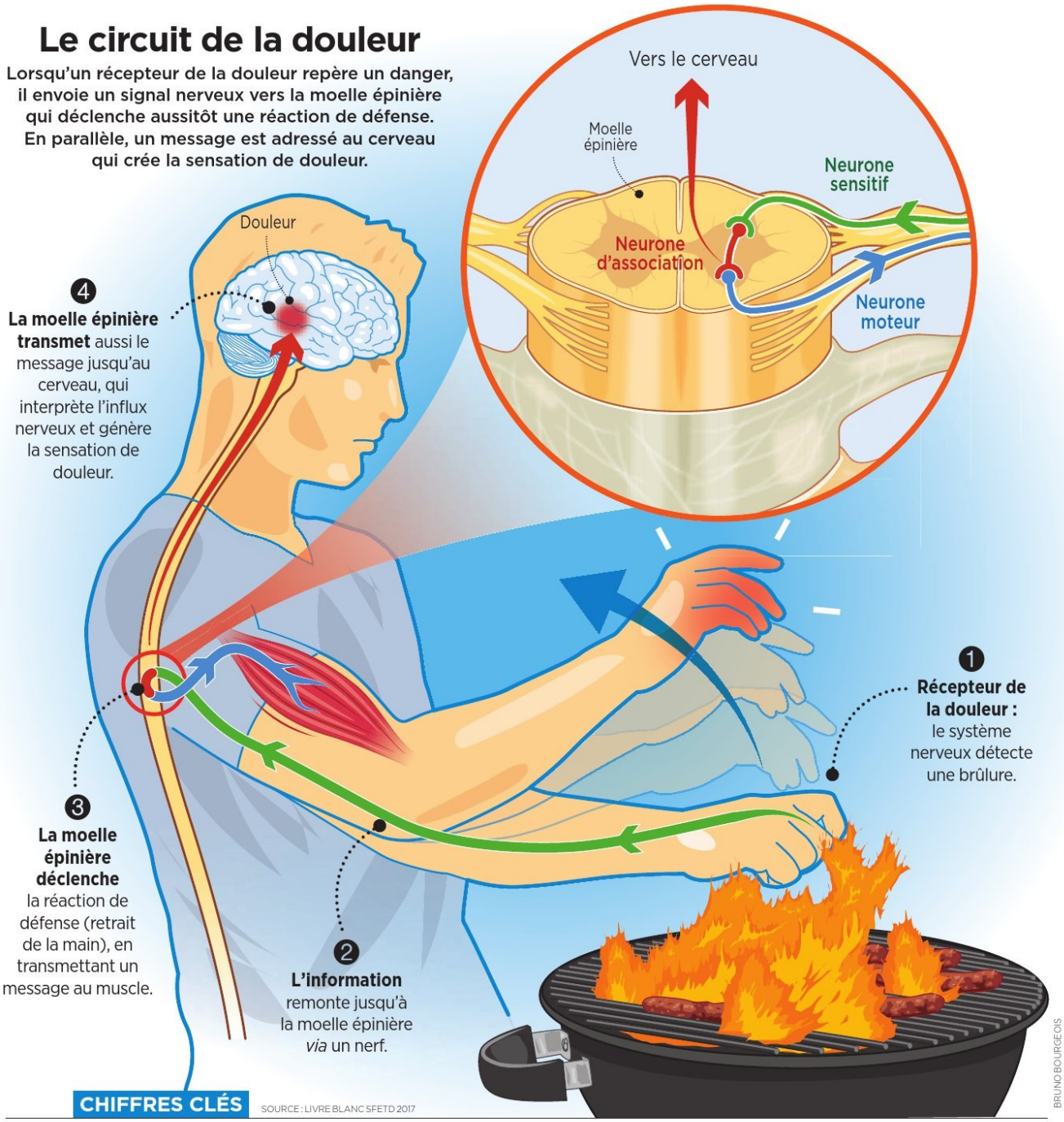
Par Sylvie Riou-Milliot

En France, 12 millions de personnes — soit un habitant sur cinq — souffrent de douleurs chroniques, persistantes depuis au moins trois mois, dont les origines peuvent être multiples (post-opératoire, cancer, zona, diabète, sclérose en plaques, fibromyalgie…). Pour l'association internationale de la douleur (International Association Study of Pain), il s'agit d'une *« expérience sensorielle et émotionnelle désagréable »*. Une définition qui révèle la difficulté à décrire ce qui s'avère surtout une expérience personnelle influencée à des degrés divers par des facteurs biologiques, psychologiques et sociaux. Car nous ne sommes pas tous égaux devant la douleur. Pour les personnes concernées, il s'agit de vivre « avec » la douleur pour *« tenir »*, selon l'expression de David Le Breton (1). Bonne nouvelle, la « boîte à outils » antidouleur, longtemps limitée à la seule approche médicamenteuse et son cortège d'effets secondaires, se diversifie. La preuve avec ces six techniques qui reposent sur un courant électrique, un champ magnétique, la lumière infrarouge, ou encore des substances sécrétées par des bactéries ou des mollusques marins. Si ces différentes approches ne sont pas toujours bien connues du public, elles peuvent soulager et améliorer la qualité de vie. Pour qu'évolue enfin cette trop faible proportion — à peine 3 % — de patients douloureux chroniques bénéficiant d'une prise en charge dans l'un des 250 centres antidouleur de l'Hexagone (2). ■

(1) Tenir, Éditions Métailié, 2017. (2) sciav.fr/927douleur

Le circuit de la douleur

Lorsqu'un récepteur de la douleur repère un danger, il envoie un signal nerveux vers la moelle épinière qui déclenche aussitôt une réaction de défense. En parallèle, un message est adressé au cerveau qui crée la sensation de douleur.



BRUNO BOURGEOIS

CHIFFRES CLÉS

SOURCE : LIVRE BLANC SFETD 2017

12 millions de Français souffrent de douleurs chroniques

1 sur 2 a une qualité de vie altérée

2 sur 3 ne sont pas soulagés par les traitements

20 % des patients opérés gardent des séquelles douloureuses

Environ 250 centres antidouleur existent en France

Moins de 3 % des patients douloureux chroniques ont accès aux centres antidouleur

JORDI MAGRANS / SHUTTERSTOCK

Modulable par le patient, le courant électrique de faible intensité appliqué sur les zones douloureuses a un effet analgésique.

Neurostimulation électrique transcutanée

L'électricité sur la peau trompe le cerveau

Comment brouiller le message douloureux que le cerveau perçoit en cas de douleurs chroniques ? En utilisant une méthode d'électrostimulation, qui fait aujourd'hui partie des traitements très fréquemment proposés dans de nombreuses situations, dont la liste s'allonge régulièrement : douleurs lombaires, cervicales, fibromyalgie, cicatrice, zona, douleurs du membre fantôme… Toutes ces douleurs, dites neuropathiques périphériques localisées, peuvent bénéficier de cette technique appelée Tens (de l'anglais *transcutaneous electrical nerve stimulation*, en français neurostimulation électrique transcutanée). Non pharmacologique et non invasive, elle est utilisée en alternative ou en complément d'un traitement médicamenteux. La Tens repose sur un courant électrique de faible tension directement appliqué sur la peau au niveau des zones concernées grâce à des patchs contenant des électrodes reliées à un stimulateur électrique. Le patient en module l'intensité selon ses besoins avec une télécommande ou même son téléphone.

Un renforcement des systèmes de contrôle de la douleur

« Est-ce que ça fait mal ? me demandent souvent les patients à la première séance, raconte Karine Constans, infirmière ressource douleur au centre hospitalier de Beauvais (Oise). *Je leur réponds évidemment que non, ici nous sommes dans un centre antidouleur et j'explique les deux mécanismes de la Tens qui renforcent les systèmes naturels de contrôle de la douleur.* » Le premier agit en favorisant l'augmentation de la production d'endorphines, les neuromédiateurs capables d'endormir les neurones. Le second a été modélisé par la théorie du *gate control* (ou portillon). Ce mécanisme repose sur le même principe que le réflexe qui consiste, en cas de choc sur une partie du corps, à frotter avec une main la zone douloureuse, ce qui permet de la soulager temporairement. Car frotter la peau active les fibres nerveuses du toucher dites A-delta, ce qui modifie la transmission au cerveau de l'information de la douleur *(voir l'infographie p. 63)*. De même, l'envoi du courant de la Tens inhibe la propagation du mes-

sage douloureux. Une fois les principes expliqués, reste à appliquer le patch sur la zone douloureuse et à le régler. Pour un maniement optimal garant d'une efficacité dans 60 % des cas environ, *« cette étape d'éducation et d'aide à l'utilisation, absolument primordiale, doit être réalisée par des professionnels, de préférence dans un centre antidouleur »*, avertit l'infirmière. L'ignorer ou la réaliser trop rapidement conduisent en effet souvent à l'abandon rapide de la technique.

Un patient actif dans la prise en charge de la technique

Or, les patients peuvent se procurer des électrostimulateurs sans nécessairement passer par un médecin et sans aucune garantie : le marché est vaste et très facile d'accès (Internet, pharmacies…). Il existe des dizaines d'appareils différents, avec ou sans fil (plus pratiques mais plus onéreux), de qualité inégale. Toutefois, pour obtenir un remboursement, le prescripteur doit être un algologue, médecin d'une structure traitant la douleur. Bien encadrée, *« la technique a surtout l'avantage de rendre le patient actif dans sa prise en charge,* poursuit Karine Constans, *car il va apprendre à bien positionner les électrodes, choisir la bonne intensité, régler la fréquence qui lui correspond. »* Quelques contre-indications existent cependant : épilepsie, grossesse et port d'un défibrillateur cardiaque implantable. ■

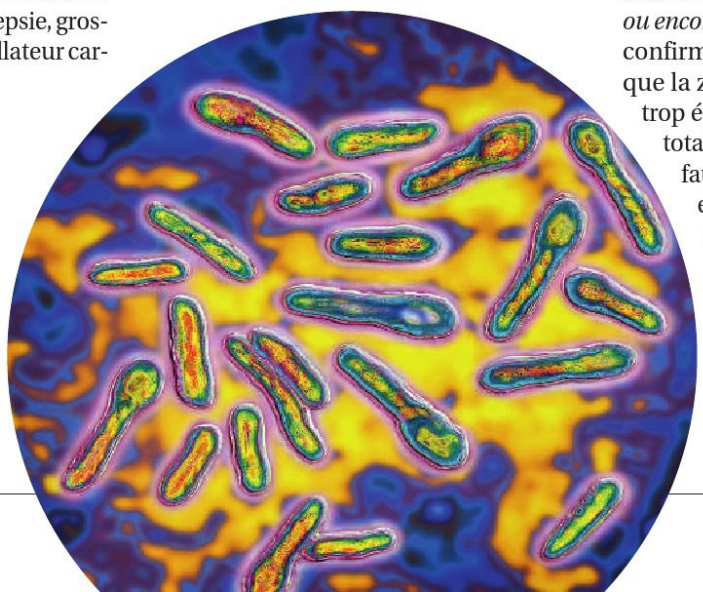
Toxine botulique

Des injections contre la migraine chronique

Une trentaine de micro-injections de toxine botulique pour traiter la migraine chronique sévère. Aujourd'hui, cette approche est devenue possible en France, la célèbre toxine ayant enfin obtenu, dix ans après nos voisins européens, l'autorisation de mise sur le marché avec un remboursement dans une indication bien précise : la migraine chronique. Il s'agit précisément de céphalées présentes au moins quinze jours par mois dont huit avec des pics migraineux, qui n'ont pas pu être soulagées par des traitements de fond. Cette approche n'existerait pas si le Dr William Binder, chirurgien plastique à Beverly Hills (États-Unis) dans les années 1990, n'avait pas écouté ses patients, ravis de l'atténuation de leurs rides et… de leurs migraines, car c'est ainsi que le lien a été fait et que les études ont démarré. Aujourd'hui, *« on sait que la toxine botulique a la capacité de bloquer la libération d'un neuromédiateur protéique, le CGRP (calcitonin gene-related peptide), sécrété en trop grande quantité par les migraineux, responsable de la vasodilatation des artères et de la douleur »*, détaille le Dr Éléna Kereun, algologue (clinique Bouchard, Marseille) dans un épisode de « Libérons-nous de la douleur »*, un podcast animé par son collègue neurochirurgien le Dr Marc Levêque. En pratique, un médecin formé à la technique réalise une trentaine d'injections intramusculaires réparties sur sept zones de la tête et du cou (front, tempes, nuque…). Une hospitalisation de jour est nécessaire, mais elle ne dure qu'une trentaine de minutes.

Au-delà de la migraine, le champ des indications est en train de s'étendre : *« Il existe désormais aussi des recommandations scientifiques fortes pour faire face aux douleurs dites neuropathiques périphériques localisées, par exemple au niveau d'une cicatrice, après un zona, un diabète ou encore sur une zone d'amputation »*, confirme Éléna Kereun. Seule limite : que la zone douloureuse ne soit pas trop étendue pour ne pas injecter au total trop de toxine. On estime qu'il faut environ deux à trois séances espacées de trois mois pour obtenir un soulagement, avec une réduction d'environ 50 % des douleurs. Reste à comprendre pourquoi certains patients répondent mieux et plus vite que d'autres. ■

* sciav.fr/927botulique



CAVALLINI JAMES / BSIP

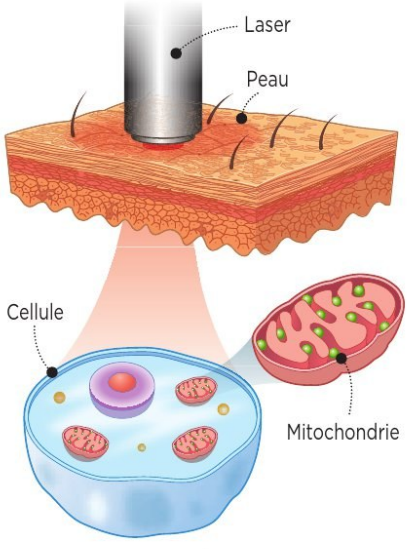
La bactérie « Clostridium botulinum » sécrète une toxine qui, injectée à très faibles doses, bloque la libération d'un neuromédiateur responsable de la douleur.

Photobiomodulation

Le laser soulage les douleurs liées aux chimiothérapies

La lumière sur la peau pour soulager la douleur et améliorer la qualité de vie des patients atteints de cancer : c'est l'un des objectifs de la photobiomodulation (PBM). Cette technique est issue, d'une part, des travaux de photothérapie (*lire* S. et A. *n° 907*), utilisés dès les années 1950 pour traiter la jaunisse des bébés et, d'autre part, de l'usage en dermatologie des lasers non thermiques (*low level laser therapy* ou LLLT) mis au point dans les années 1970. *« La PBM est une approche en plein essor dans les douleurs compliquées du cancer présentes tout au long des étapes de la maladie mais encore sous-estimées et insuffisamment traitées »*, résume le Dr Antoine Lemaire, chef du pôle cancérologie et spécialiste de la douleur au centre hospitalier de Valenciennes (Nord), l'un des quatre centres experts de cette technique *. Le centre nordiste est le seul à disposer d'une cabine permettant d'agir sur le corps entier, et pas seulement sur une zone localisée. Il est de plus celui qui détient l'une des plus fortes activités : environ 2500 patients et 15 000 séances de PBM depuis six ans.

L'origine de cette approche est une observation qui s'est faite… dans l'espace. Plus précisément, lorsque, dans les années 1990, la Nasa s'est rendu compte que les microblessures sur les mains des astronautes jardiniers qui s'étaient occupés des plantes exposées à des lumières laser cicatrisaient mieux que celles des astronautes n'ayant pas jardiné. Depuis, des travaux, publications et colloques sur le sujet se sont multipliés et, en 2014, le terme de « PBM » a définitivement remplacé celui de « LLLT ». Concrètement, il désigne l'utilisation thérapeutique de sources de lumière dont la longueur d'onde se situe dans le spectre visible et proche de l'infrarouge (entre 600 et 1000 nanomètres).



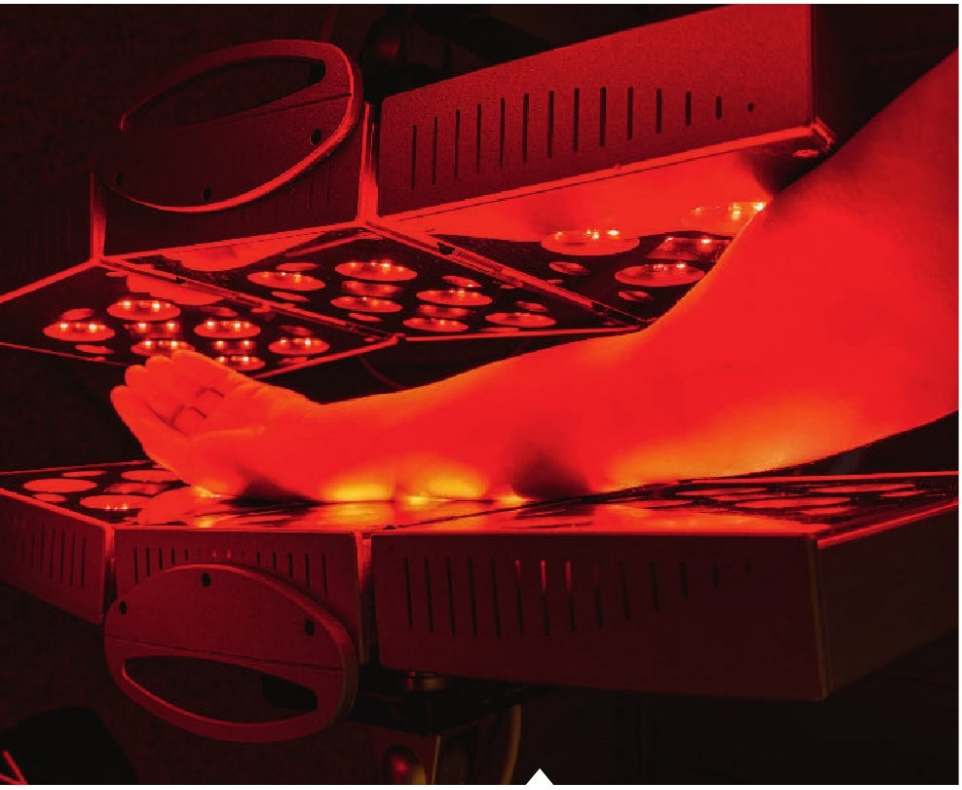
BRUNO BOURGEOIS

La source de lumière fournie par le laser stimule les mitochondries qui vont redonner de l'énergie à la cellule.

Objectif : fournir de l'énergie aux cellules. *« La photobiomodulation, c'est de la biomédecine,* explique Antoine Lemaire. *Ses mécanismes d'action se situent au cœur même des cellules, au niveau des centrales énergétiques que sont les mitochondries. Leur fonctionnement étant altéré en cas de cancer, l'exposition des cellules à la lumière permet, selon un processus non thermique (non chauffant), d'agir sur différents paramètres comme la réduction de l'inflammation, l'immunomodulation, la régénération cellulaire, la modulation des neurotransmetteurs impliqués dans la douleur, ou encore la cicatrisation des tissus. »*

Une méthode non invasive et sans effets secondaires

En pratique, la PBM, non invasive et sans effets secondaires, est une sorte de couteau suisse, particulièrement utilisée lors des multiples complications induites par la maladie elle-même et ses traitements. C'est notamment le cas des douleurs neuropathiques dites chimio-induites (dues à certaines chimiothérapies), qui se traduisent par des fourmillements et douleurs survenant surtout aux mains et aux pieds. Ou encore des séquelles dues aux séances de radiothérapie, au niveau de la peau (brûlures, irritations, perte des cheveux) ou des muqueuses (sécheresse buccale, manque de salive).



CENTRE HOSPITALIER DE VALENCIENNES

Les propriétés antalgiques, anti-inflammatoires et cicatrisantes de la photobiomodulation sont autant d'atouts face aux complications induites par les cancers et leurs traitements.

Si les travaux de recherche fondamentale ont permis de comprendre ses mécanismes depuis plusieurs décennies, *« le premier consensus international sur l'utilisation de la PBM, élaboré par l'association mondiale Walt (World association for photobiomodulation therapy), ne date que de 2022 »*, précise Antoine Lemaire. La technique est donc jeune, encore méconnue et réservée aux seuls centres équipés, et bénéficiant de personnel formé à la manipulation des lasers.

Cet après-midi, à Valenciennes, dans les trois boxes du service entièrement réservés à la PBM, les patients se succèdent toutes les 20 minutes, le temps de leur séance. Il s'agit souvent de personnes très gênées par le simple contact sur la peau des chaussettes ou des chaussures, ou ne s'alimentant qu'avec grande difficulté. Toutes sont accueillies par Hélène, l'infirmière formée à la manipulation des différents lasers. Il en existe en effet plusieurs types, les industriels ayant ces dernières années rivalisé d'inventivité pour développer des dispositifs de taille et de forme très différentes, permettant de s'adapter au mieux à la zone du corps à « illuminer » : ici des palettes à glisser dans la bouche, sur le palais, là des plaques destinées à être disposées autour du cou, sans oublier la cabine corps entier ou encore le casque en cas d'alopécie (chute des cheveux) ou de brouillard cérébral (*chemobrain*), un dysfonctionnement cognitif fréquent en cancérologie. Hélène installe le patient, applique le protocole de traitement — toujours décidé par le médecin lors de la première consultation — et revient régulièrement s'assurer que tout va bien.

Un recours trop tardif dû à la méconnaissance de l'outil

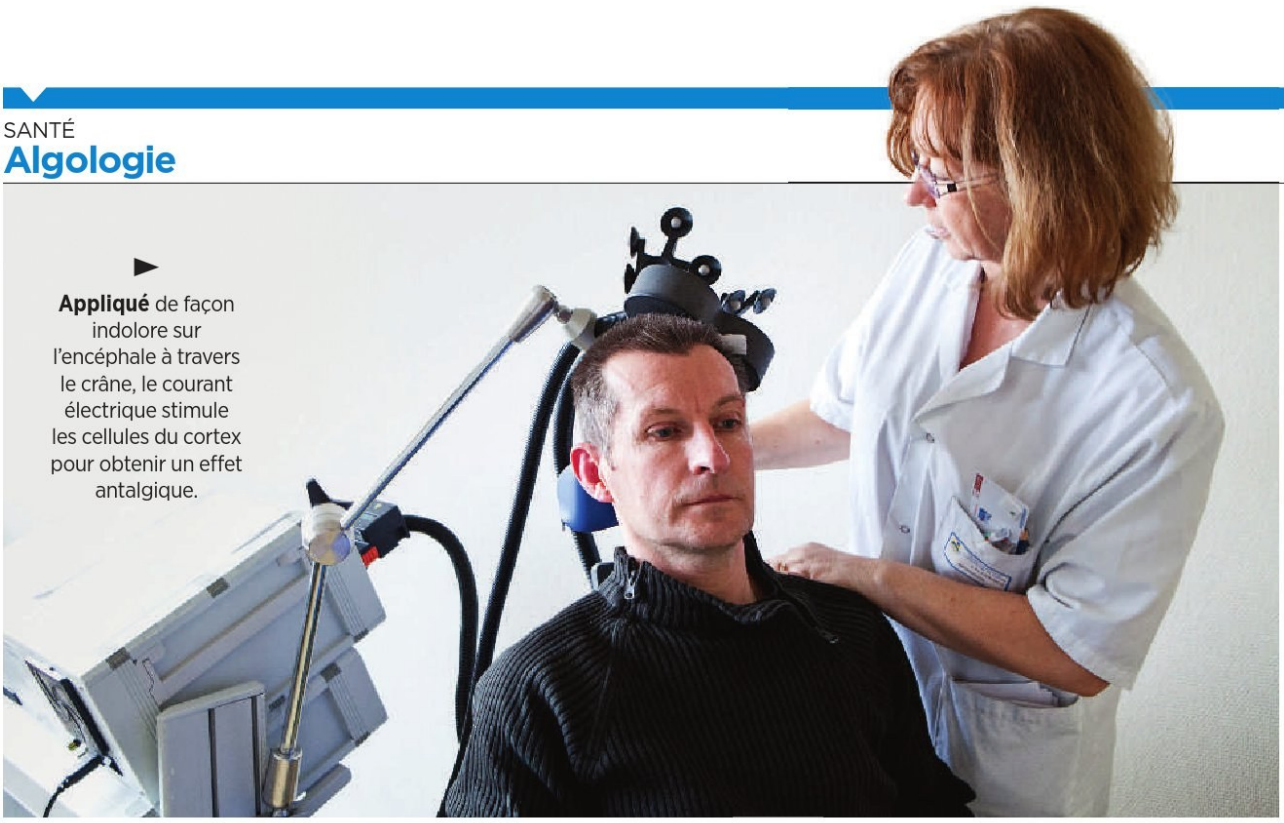
Si la part de l'effet placebo ne peut, comme dans tout traitement, être entièrement éliminée, les retours des patients, comme les preuves photographiques prises avant et après les illuminations, sont impressionnants. *« Le plus souvent, cela marche très bien, parfois tout de suite, mais certains patients répondent mieux que d'autres et nous ne savons pas encore les différencier »*, reconnaît Antoine Lemaire. Qui poursuit : *« Aujourd'hui, le recours à la PBM reste très hétérogène, peu de centres étant équipés de manière correcte et la qualité des dispositifs n'étant pas toujours au rendez-vous. »* D'où la nécessité à l'avenir de déterminer des critères de qualité, ce qui est précisément la mission d'un groupe de travail récemment créé. Autre frein : une utilisation souvent trop tardive, en raison d'une relative méconnaissance et d'un certain scepticisme. *« Son recours plus précoce permettrait pourtant de prévenir les complications dues aux traitements »*, regrette Antoine Lemaire qui a prévu de conduire des études en ce sens. En attendant, un quatrième dispositif de PBM vient de rejoindre l'institut Gustave-Roussy (Villejuif) et un séminaire sur le sujet s'y déroulera ce printemps. ■

CENTRE HOSPITALIER DE VALENCIENNES

« C'est une approche en plein essor dans les douleurs compliquées du cancer, présentes tout au long des étapes de la maladie »

Antoine Lemaire, chef du pôle cancérologie et spécialiste de la douleur au centre hospitalier de Valenciennes (Nord)

• Les trois autres sont : Institut Gustave-Roussy (Villejuif), Montpellier, Marseille.



Appliqué de façon indolore sur l'encéphale à travers le crâne, le courant électrique stimule les cellules du cortex pour obtenir un effet antalgique.

AMELIE-BENOIST / IMAGE POINT FR / BSIP

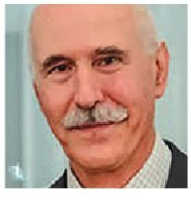
Stimulation magnétique transcrânienne répétitive

Un aimant module l'activité des neurones

La stimulation magnétique transcrânienne répétitive (r-TMS), une technique dite de neuromodulation, génère un courant électrique par l'application d'un champ magnétique au moyen d'une bobine (aimant). Visant à reproduire les effets des stimulations chirurgicales pratiquées il y a trente ans — qui nécessitaient alors l'ouverture du crâne —, la r-TMS se pratique aujourd'hui de manière non invasive et sans chirurgie. Validée dès 2008 par la Food and Drug Administration aux États-Unis dans le traitement de la dépression réfractaire (*lire* S. et A. *n° 924*), elle fait depuis quelques années une percée notable pour traiter la douleur.

Si ses mécanismes précis d'action restent mal compris, les spécialistes savent aujourd'hui que le champ magnétique utilisé agit non pas directement sur la zone stimulée — le cortex moteur —, mais par l'intermédiaire des connexions qui relient cette zone à d'autres régions du cerveau. Le champ magnétique induirait une dépolarisation des neurones, permettant, outre des effets neurophysiologiques directs, la libération de neuromédiateurs (opioïdes, dopamine…). Celle-ci modifie les connexions interneuronales et module ainsi le ressenti de la douleur du patient plutôt que sa véritable intensité. « *Selon les études menées chez l'animal et chez l'humain, les principales régions impliquées seraient le thalamus, le cortex préfrontal médian et cingulaire périgénual, l'insula et des régions du tronc cérébral comme la substance grise périaqueducale, toutes envoyant des messages inhibiteurs vers la moelle épinière* », explique Luis Garcia-Larrea, directeur de l'équipe NeuroPain du Centre de recherche en neurosciences de Lyon (CRNL) et président de la Fédération européenne de la douleur.

La technique est déjà disponible dans environ une quinzaine de centres experts en France. Elle est utilisée dans la prise en charge des douleurs d'origine neuropathique, réfractaires aux traitements habituels et s'exprimant sous forme de brûlures, de décharges électriques ou de fourmillements en lien avec une lésion périphérique (diabète) ou centrale du système nerveux (ou encore après une chirurgie dorso-lombaire). Ici, le patient, installé dans



L. GARCIA-LARREA

« Environ un patient douloureux sur deux répond à cette neuromodulation à court terme »

Luis Garcia-Larrea, directeur de l'équipe NeuroPain du Centre de recherche en neurosciences de Lyon (CRNL)

une salle dédiée disposant de la machine, reste assis sans bouger pendant environ 20 minutes.
Cette approche s'effectue toujours en hospitalisation de jour. On estime qu'environ 1500 personnes dans l'Hexagone y ont déjà eu recours. *« Environ un patient douloureux sur deux répond à la r-TMS à court terme, mais il n'est pas encore possible d'identifier à l'avance les répondeurs des non-répondeurs »*, précise Luis Garcia-Larrea. Afin de gagner en efficacité tout en limitant les contraintes (déplacements répétés des patients), différentes stratégies ont été tentées. *« Nous avons l'habitude de proposer une première phase d'attaque, soit quatre ou cinq séances espacées de 15 jours et d'évaluer par des questionnaires l'efficacité dans la vraie vie. Nous décidons ensuite de poursuivre ou pas par une phase d'entretien, une ou deux séances hebdomadaires pendant plusieurs semaines sur six mois à un an »*, détaille le neuroscientifique.

En attente d'une reconnaissance par la Haute Autorité de santé

À la fin de 2023, un groupe de travail d'une quinzaine de spécialistes de la douleur, issus de la Société française d'étude et traitement de la douleur (SFETD), actif soutien du développement de la technique dans l'Hexagone, a remis un rapport à la Haute Autorité de santé, avec pour objectif la reconnaissance de la r-TMS. La réponse est attendue avant 2025. Mais déjà, une technique proche est testée, plus maniable et utilisant un courant continu. Dite t-DCS (stimulation transcrânienne à courant continu), elle se présente sous la forme d'un casque utilisable à domicile. *« Des études sont en cours pour mieux savoir à quel patient proposer la r-TMS ou la t-DCS, chacun réagissant parfois de manière différente à l'une ou l'autre des deux techniques »*, indique le chercheur. ■

Radiofréquence pulsée

Détruire les fibres nerveuses de la douleur

Perturber les signaux douloureux envoyés au cerveau pour diminuer la douleur. Tel est l'objectif de cette technique non médicamenteuse de neuromodulation appelée fréquence pulsée (dite aussi thermocoagulation ou rhizolyse). Elle est le plus souvent utilisée pour traiter des douleurs localisées au niveau du dos, résultant de l'irritation des petites articulations de la colonne vertébrale, les facettes articulaires. Elle repose sur l'envoi d'impulsions électriques ou thermiques, toujours au niveau des nerfs responsables de la douleur. Le geste s'effectue en hospitalisation ambulatoire. Le patient est allongé sur le ventre, pas totalement endormi, mais sous une anesthésie locale qui lui permet d'échanger avec le neurochirurgien. Celui-ci, sous contrôle radiographique, va dans un premier temps positionner une aiguille au contact des facettes articulaires des vertèbres concernées. Il s'agit d'un geste dit percutané, sans incision de la peau, ne laissant pas de cicatrice. Puis une électrode est utilisée pour détruire les fibres nerveuses chargées de véhiculer le message douloureux. Efficace dans environ 50 % des cas, le geste a l'avantage de pouvoir être répété et peut concerner d'autres localisations (genou, vertèbres cervicales dans le cas de certains maux de tête appelés céphalées d'Arnold). ■

50 %
d'efficacité pour cette électrode qui efface le message douloureux.

Analgésie intrathécale

Une pompe qui agit au niveau de la moelle

Œuvrer au plus près de la moelle épinière et de ses récepteurs impliqués dans la modulation du message douloureux. Voilà ce que permet l'analgésie intrathécale, proposée uniquement dans le cas de douleurs intenses d'origine cancéreuse, réfractaires aux traitements usuels. Elle consiste en la pose, sous anesthésie générale, d'une pompe placée sous la peau contenant non pas des morphiniques mais, par exemple, une molécule comme le ziconotide, un peptide isolé du venin d'un mollusque marin *(Conus magus)* particulièrement actif dans les douleurs dites neuropathiques. Reliée à un cathéter fin assurant la délivrance directe de la molécule dans le liquide céphalo-rachidien, la pompe est activée par le patient au moyen d'une télécommande, lui permettant si besoin d'injecter des doses supplémentaires. Très efficace, cette technique a démontré sa supériorité en cas d'échec des traitements opioïdes. Néanmoins, signale la SFETD, *« elle reste insuffisamment connue et utilisée par les professionnels, car la mettre en place ne s'improvise pas, organisation et expertise étant nécessaires »*. ■

Ces émulsifiants qui favorisent les maladies

Longtemps considérés comme neutres, les émulsifiants sont devenus un sujet de préoccupation pour les scientifiques. Parmi la longue liste de ces additifs alimentaires, certains augmenteraient le risque de maladies cardio-vasculaires ou métaboliques, voire de cancers, révèlent plusieurs études. Tour d'horizon.

Émulsifiants. Derrière ce terme obscur se cache une famille d'additifs très présente dans la liste des ingrédients des denrées alimentaires. Or, les scientifiques s'accordent de plus en plus à les considérer comme potentiellement nocifs pour la santé. « *En septembre 2023, nous avons publié dans le* British Medical Journal *un travail épidémiologique montrant une association entre la consommation de sept agents émulsifiants et un risque accru de maladies cardio-vasculaires,* alerte Mathilde Touvier, directrice de recherche à l'Inserm. *En février dernier, nous avons révélé dans* Plos Medicine *une association entre trois émulsifiants et des risques de cancer. Nous menons aussi des travaux sur le diabète de type 2.* »
Le rôle des émulsifiants est de favoriser le mélange de deux substances non miscibles comme l'huile et l'eau. Ils empêchent, par exemple, l'huile de remonter à la surface d'une pâte à tartiner ; ils maintiennent la texture des crèmes glacées et de nombreux produits laitiers ; ou encore prolongent la conservation des gâteaux et biscuits sous emballage. Aussi, l'industrie agroalimentaire les utilise massivement : selon l'association Open Food Facts *(lire l'encadré p. 74)*, 53,8 % des produits alimentaires industriels en contiennent au moins un. Parmi les plus connus : la lécithine de soja (E322), la gomme arabique (E414), la cellulose et ses dérivés (E460 à 468), les carraghénanes (E407) ou le mono- et diglycérides d'acides gras (E471). Pas moins de 261 formulations différentes sont autorisées par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa).
Ils sont devenus un sujet de préoccupation au cours de la dernière décennie : entre 2010 et 2023, le nombre de publications scientifiques qui leur étaient consacrées a bondi de 120 à 790 sur Pubmed, la base de référence pour les articles biomédicaux. « *Jusqu'au début des années 2010, la plupart des émulsifiants étaient considérés comme des substances neutres puisque dépourvues de calories, ni bénéfiques ni négatives pour la santé. Lorsqu'elles étaient consom-*

BENOÎT CHASSAING

« Les émulsifiants auraient un rôle dans l'épidémie de diabète de type 2 et dans l'augmentation des maladies intestinales inflammatoires »

Benoît Chassaing, chercheur à l'Institut Cochin, à Paris

PLAINPICTURE

Parmi les très nombreux additifs présents dans les produits alimentaires transformés (exhausteurs de goût, conservateurs, colorants…), les émulsifiants permettent d'améliorer la texture ou la conservation.

mées, il était convenu de penser qu'elles passaient dans le tube digestif sans être absorbées par l'intestin, et donc ne se retrouvaient pas dans la circulation sanguine. L'Efsa n'a émis de restriction de consommation que pour quelques-unes, plus précisément une dose journalière admissible », explique Pauline Raoul, coautrice d'une synthèse sur ces additifs pour la revue scientifique *Foods*.

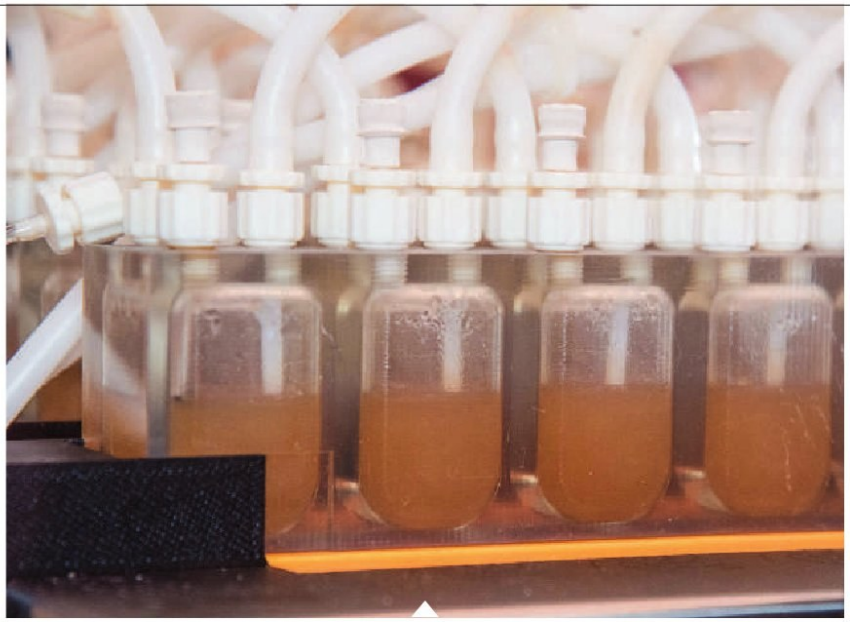
Des pathologies qui touchent surtout les pays riches

Cependant, une série de travaux sur le microbiote intestinal (l'ensemble des bactéries, virus, champignons, micro-organismes qui colonisent notre intestin) va remettre en cause cette affirmation. Parmi eux, ceux de l'équipe du biologiste Jeffrey Gordon, de l'université Washington à Saint-Louis (États-Unis), ont montré que chez les personnes en surpoids important, le microbiote intestinal présentait un déséquilibre, ce que les scientifiques nomment une dysbiose. Par ailleurs, un transfert du microbiote d'une personne obèse à une souris sans microbiote amène cette dernière à grossir de manière incontrôlée. *« Au départ, ces travaux ont surpris, mais depuis, ces expériences ont été reproduites et elles constituent aujourd'hui un standard pour la recherche. Elles démontrent que dans l'étude de certaines maladies, un microbiote altéré est un facteur déterminant,* complète Benoît Chassaing, chercheur à l'Institut Cochin, à Paris. *Ces découvertes ont soulevé de nouvelles interrogations pour les scientifiques : qu'est-ce qu'un microbiote sain ? Quels sont les facteurs susceptibles de le perturber ?* »
Parallèlement, dans les pays industrialisés, les chercheurs constatent le développement de maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (Mici). En France, entre 1998 et 2008, une augmentation de plus de 70 % de ces affections a été observée parmi les jeunes âgés de 10 à 19 ans, et 270 000 personnes sont suivies pour ces pathologies, selon l'observatoire des Mici (Epimad). *« Comme ces maladies touchent en priorité, en dehors de facteurs génétiques, les habitants des pays riches, nous avons émis l'hypothèse que l'augmentation de ces affections était liée au mode de vie, notamment à l'alimentation,* explique Carlos Monteiro, épidémiologiste brésilien spécialiste des aliments ultratransformés. *Nous consommons de plus en plus d'aliments riches en additifs (édulcorants, exhausteurs de goût, colorants, émulsifiants) et en arômes. Nous avons*

commencé à penser que ces molécules interagissaient avec notre microbiote intestinal, qu'elles pourraient être à l'origine de ces dysbioses et favoriser des maladies métaboliques comme le diabète, l'obésité et les Mici. Très rapidement, l'attention s'est portée sur les émulsifiants en raison de leur utilisation massive aux États-Unis. »

Des effets saisissants observés chez les souris

Pour étayer cette hypothèse, un travail précurseur mené en 2009 par Alexander Swidsinski de l'université Humboldt, à Berlin (Allemagne), a montré qu'un émulsifiant, le carboxyméthyl cellulose ou E466, entraînait une inflammation chronique de l'intestin grêle chez les souris sensibles. Six ans plus tard, Benoît Chassaing, qui se trouvait alors au centre de recherche sur l'inflammation, l'immunité et l'infection de l'université d'État de Géorgie (États-Unis), apporte de nouvelles preuves dans une publication parue dans la revue *Nature* : « *Nous avons donné à des souris deux émulsifiants (E433 et E466) largement utilisés aux États-Unis* », raconte le chercheur. Les souris ont alors développé deux types de pathologies. Celles qui n'avaient aucune prédisposition génétique aux Mici ont manifesté une légère inflammation associée à une prise de poids aberrante. Mais celles qui, au contraire, avaient des prédispositions génétiques, ont présenté des inflammations très sévères. « *Ces observations suggèrent que les agents émulsifiants ont un rôle dans l'épidémie de diabète de type 2 et d'obésité et participeraient aussi à l'augmentation des Mici* », conclut Benoît Chassaing.



BENOÎT CHASSAING

Microbiote artificiel obtenu à partir des micro-organismes « récoltés » dans les selles d'un humain puis cultivés « in vitro » pour tester les effets des émulsifiants.

Sur quelle base physiologique peut-on expliquer ces résultats ? L'intestin est la partie de notre tube digestif qui permet aux molécules issues de la digestion d'être absorbées et d'aller nourrir l'ensemble des organes. Cette surface de contact est très protégée pour éviter que les molécules nocives ne pénètrent dans les tissus internes. La première barrière est un mucus (une sorte de gel), la deuxième est constituée de cellules dites épithéliales reliées entre elles par des jonctions serrées. La troisième ligne de défense est une barrière immunitaire. Les émulsifiants perturbent cette barrière de protection. « *Nous ne savons pas encore comment le dysfonctionnement se met précisément en place,* concède Mathilde Body-Malapel, chercheuse à l'Institut de recherche translationnelle sur l'inflammation, à Lille. *Ce que l'on peut dire, c'est qu'en interagissant avec le microbiote, l'émulsifiant va permettre à certaines bactéries de se retrouver dans la couche interne du mucus.* » Reconnues comme étrangères, ces bactéries vont déclencher une réponse immunitaire : c'est l'inflammation. Une réaction normale, mais qui, si elle persiste, peut entraîner des lésions comme chez les personnes atteintes de Mici. « *Rendue plus perméable, la paroi se trouve alors au contact des bactéries, l'inflammation devient chronique et le mécanisme s'autoentretient* », explique Mathilde Body-Malapel. Les émulsifiants sont-ils les seuls responsables de l'inflammation ? « *D'autres processus comme l'ingestion de microplastiques ou la pollution de l'air peuvent également la favoriser,* répond la chercheuse lilloise. *Mais pour les émulsifiants, le degré de preuve est plus important.* »

En France, l'Équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle (Eren), une

OPEN FOOD FACTS

Le « Wikipédia » de l'alimentation

Open Food Facts est une initiative citoyenne lancée en 2012 dans le but de rendre accessible à tous la composition des denrées alimentaires. Son développement a été facilité par l'adoption en 2011 d'un règlement européen rendant obligatoires 12 mentions sur les produits alimentaires emballés, incluant la liste des ingrédients, la déclaration des allergènes et le tableau nutritionnel. Les deux cofondateurs d'Open Food Facts, Stéphane Gigandet et Pierre Slamich, ont exploité ces obligations en mobilisant une communauté de volontaires qui photographient les emballages et alimentent une base de données. En France, environ un million de personnes ont participé au moins une fois à ce projet géré par une association loi 1901. Les données sont accessibles à l'adresse suivante : https://fr.openfoodfacts.org

collaboration de l'Inserm, de l'Inrae et de l'université Sorbonne Paris-Nord, est particulièrement en pointe sur le sujet. Dans le cadre de sa cohorte NutriNet-Santé, plus de 175 000 personnes renseignent régulièrement le menu de leurs repas avec les marques des produits consommés. « *Nous avons la chance de disposer de bases de données comme Open Foods Facts ou Oqali, qui décrivent précisément la composition des aliments mangés par nos volontaires, notamment le type d'additifs qu'ils ingèrent le plus régulièrement. Ce sont des données que n'ont pas les autres cohortes au niveau international* », souligne Mathilde Touvier, responsable de la cohorte NutriNetSanté. Elles ont permis de montrer l'impact des émulsifiants sur les maladies cardio-vasculaires et les cancers.

Associer épidémiologie et expérimentations

« *Si les recherches en épidémiologie sont nécessaires, elles ne permettent pas à elles seules d'établir une causalité directe entre maladie et émulsifiant,* relève son collègue Bernard Srour. *Il faut une accumulation de preuves épidémiologiques et expérimentales.* » C'est à ce travail que s'attellent Benoît Chassaing et son équipe de l'Institut Cochin. De retour des États-Unis, il a mené plusieurs séries d'expériences : l'une d'elles a consisté à reproduire un microbiote humain dans des tubes à essai et à tester 20 émulsifiants. La lécithine n'a eu aucun effet délétère, tandis que les carraghénanes (E407) et les gommes arabiques (E414) ont modifié significativement l'équilibre bactérien de la flore expérimentale. Ensuite, il a mené une expérience dans laquelle sept volontaires ont suivi un régime enrichi avec un émulsifiant (E466) pendant onze jours, neuf autres servant de groupe témoin. À la fin, les premiers ont présenté un microbiote à la composition moins diversifiée, et pour deux participants, une inflammation intestinale. « *Tous les émulsifiants n'ont pas un rôle dans la survenue d'un déséquilibre du microbiote,* conclut le chercheur français. *Par ailleurs, nous ne sommes pas tous égaux face à la dysbiose, car il y a une grande variété de microbiotes.* »

Les recommandations émises en décembre 2022 par la Société européenne de nutrition clinique et de métabolisme préconisent, pour les patients atteints de Mici, d'éviter la consommation d'émulsifiants et plus largement de produits industriels riches en additifs. Un éditorial paru en janvier dans *Gut-BMJ* va même plus loin : il déconseille de donner ces aliments aux bébés de moins d'un an, une étude très documentée ayant montré qu'une consommation précoce augmente de façon significative le risque de maladies inflammatoires. « *En attendant de nouveaux résultats et une réévaluation de la réglementation européenne pour certains émulsifiants, s'il y a un message à faire passer au grand public, c'est de privilégier la consommation quotidienne d'aliments non transformés* », recommande Pauline Raoul. ■

Isabelle do O'Gomes

Quel risque pour quel émulsifiant ?

Sur les 261 formulations autorisées en Europe, ces 16 émulsifiants sont identifiés par plusieurs études comme à risque. D'autres sont en cours d'analyse.

Code européen	Nom scientifique	Risque associé
E407 et E407b	Carraghénanes	Cancer, Mici (maladies inflammatoires chroniques de l'intestin)
E414	Gomme arabique	Mici
E433	Polysorbate 80	Mici
E460	Cellulose, cellulose microcristalline, cellulose en poudre	Maladies cardio-vasculaires
E461	Méthylcellulose	Maladies cardio-vasculaires
E462	Éthylcellulose	Maladies cardio-vasculaires
E463	Hydroxypropylcellulose	Maladies cardio-vasculaires
E464	Hydroxypropyl méthylcellulose	Maladies cardio-vasculaires
E465	Méthyléthyl cellulose	Maladies cardio-vasculaires
E466	Carboxyméthyl cellulose de sodium, gomme de cellulose	Maladies cardio-vasculaires, Mici
E467	Éthyl hydroxyéthyl cellulose	Maladies cardio-vasculaires
E468	Carboxyméthyl cellulose sodique réticulée, gomme cellulosique réticulée	Maladies cardio-vasculaires
E471	Mono- et diglycérides d'acides gras	Maladies cardio-vasculaires, cancer
E472	Esters de mono- et diglycérides d'acides gras	Maladies cardio-vasculaires
E472b	Esters lactiques des mono- et diglycérides d'acides gras, lactoglycérides	Maladies cardio-vasculaires
E472c	Esters citriques des mono- et diglycérides d'acides gras, citroglycérides	Maladies cardio-vasculaires

SOURCES - **Cancer :** sciav.fr/plosmedecine – **Mici :** sciav.fr/gastroenterology ; sciav.fr/IBD ; sciav.fr/nature ; sciav.fr/microbiome - **Maladies cardio-vasculaires :** sciav.fr/BMJ.

Les bienfaits de la betterave

Très peu calorique, ce légume racine est bien doté en fibres et en antioxydants. Le jus de betterave a de nombreuses vertus, notamment en matière de protection du système cardio-vasculaire.

Crapaudine, burpee's golden, chioggia… Qu'elle soit pourpre, jaune ou à rayures, la betterave potagère *(Beta vulgaris)* est un légume racine, à l'instar de la carotte et du navet. Il ne faut évidemment pas la confondre avec d'autres variétés comme la betterave fourragère — destinée à l'alimentation des ruminants — ou sucrière, cultivée pour la production de sucre de table (ou saccharose) et d'alcool. Riche en fibres et en antioxydants, dotée de nombreux bienfaits pour la santé, la betterave se déguste jusqu'à ses feuilles, cuisinées comme des épinards.

Elle apporte de nombreux nutriments

Très peu calorique (43 kcal/100 g de betterave rouge cuite) car riche en eau (88,3 g/100 g), la betterave est bien dotée en fibres (2,5 g/100 g) qui, en gonflant dans l'estomac, provoquent plus rapidement une sensation de satiété. Elle apporte aussi une petite quantité de protéines (1,74 g/100 g de betterave crue) et davantage de glucides (9 g/100 g de betterave crue) que les légumes verts (entre 3 et 4 g). La betterave crue est intéressante pour sa teneur en manganèse (environ 20 % des besoins journaliers) et en vitamine B9 (100 microgrammes/100 g contre 12,4 microgrammes une fois cuite), impliquée dans le renouvellement cellulaire (1).

C'est une rare source de bétalaïnes

Ces pigments sont responsables de la couleur caractéristique de la betterave : les bétacyanines (ou bétanines) de couleur rouge à violet constituent 75 à 95 % des bétalaïnes et les bétaxanthines (dont les vulgaxanthines), de couleur jaune à orange, 5 à 25 %. Par exemple, un jus de betterave contient environ 1,2 g/ml de bétanine. Les bétalaïnes sont de puis-

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

OXYDE NITRIQUE Composé chimique formé d'un atome d'oxygène et d'un atome d'azote, naturellement produit par les cellules internes des vaisseaux sanguins, les globules blancs et le cerveau.

INDEX GLYCÉMIQUE (IG) Valeur permettant de choisir, parmi les aliments contenant des glucides, ceux qui élèvent le moins le taux de glucose dans le sang. En dessous de 55, on parle d'IG bas et au-dessus de 70, d'IG élevé.

LACTOFERMENTATION Mode de conservation consistant à laisser macérer les aliments dans du sel. La technique limite ainsi leur contact avec l'air, ce qui favorise la prolifération de bactéries lactiques.

sants antioxydants aux propriétés antivirales, antibactériennes et antifongiques (2). À noter que la bétanine n'est pas décomposée lors de la digestion et peut colorer en rouge de manière temporaire les urines. La betterave renferme également des composés phénoliques (acide gallique, acide vanillique, etc.) et ses feuilles, de la lutéine et de la zéaxanthine, des caroténoïdes qui aideraient à prévenir la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA).

Elle aide à réduire la pression artérielle

Avec 320 mg/100 g de potassium, la betterave contribue à abaisser la pression artérielle. De plus, comme les épinards, le radis ou le céleri, elle renferme des nitrates, aux propriétés antihypertensives et vasodilatatrices, protectrices du système cardio-vasculaire. Les nitrates ingérés sont transformés en nitrites par des enzymes bactériennes (nitrates réductases) présentes dans la bouche. Ces nitrites, absorbés par l'estomac et le duodénum, favorisent la production **d'oxyde nitrique** (NO), laquelle engendre la vasodilatation de la paroi des vaisseaux sanguins et, par conséquent, une diminution significative de la pression artérielle (3). Ainsi, boire 250 ml de jus de betterave chaque jour pendant quatre semaines réduirait en moyenne de 7,7 mmHg la pression systolique et de 2,4 mmHg la pression diastolique de patients hypertendus (4).

1,4 kg
de betterave est consommé par personne et par an en France.
(SOURCE: CTIFL)

Elle améliore la performance sportive...

L'oxyde nitrique (NO) améliore aussi la circulation sanguine et augmente l'apport d'oxygène et de nutriments aux divers organes dont les muscles (5). Boire du jus de betterave aurait un impact positif sur les performances sportives, en augmentant la force musculaire et en retardant l'apparition de la fatigue physique. Des chercheurs britanniques ont observé chez des volontaires pratiquant un exercice physique intense après avoir bu un jus de betterave que leur force de contraction musculaire était supérieure d'environ 7 % à celle du groupe témoin (6). Gare toutefois à ne pas abuser de ce légume racine, car les nitrates sont aussi connus pour stimuler la formation dans l'organisme de composés N-nitrosés, cancérogènes.

... et la mémoire

Des travaux ont montré qu'un supplément de betterave à croquer (4 comprimés contenant ici 3 g d'extrait de betterave) consolidait la capacité de mémoire à court et moyen termes et améliorait, entre autres, les fonctions du lobe frontal (+ 2,57 %), lequel contrôle la prise de décision, la créativité et le raisonnement par analogie, ainsi que la flexibilité cognitive (+11,16 %) par rapport à un placebo, chez des personnes en bonne santé (7). La betterave pourrait aussi être bénéfique dans la prévention des maladies neurodégénératives telles qu'Alzheimer (8). ■

Sylvie Boistard

ANGÉLIQUE HOULBERT* Diététicienne-nutritionniste au Mans

La lactofermentation diminue sa teneur en sucres

« La cuisson de la betterave fait passer son index glycémique (IG) de 30 quand elle est crue à 65. Cela peut affecter la glycémie si la betterave est consommée en trop grande quantité, mais au regard de ses nombreux nutriments et antioxydants, elle trouve toute sa place dans nos menus, même ceux des diabétiques. Consommer de la betterave issue de la lactofermentation est intéressant car ce procédé de conservation permet de diminuer le taux de glucides, les ferments transformant une partie de ces glucides en acide lactique. »

* Auteure de *100 aliments IG à volonté*, Éd. Thierry Souccar, 2011.

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(2) Biological properties and applications of betalains, Sadowska-Bartosz I. et al, *Molecules*, 2021.

(3) Dietary nitrate from beetroot juice for hypertension, Bonilla Ocampo D. et al, *Biomolecules*, 2018.

(4) Dietary nitrate provides sustained blood pressure lowering in hypertensive patients, Kapil V. et al, *Hypertension*, 2015.

(5) The benefits and risks of beetroot juice consumption, Zamani H. et al, *Critical reviews in Food science & Nutrition*, 2021.

(6) N-labeled dietary nitrate supplementation increases human skeletal muscle nitrate concentration and improves muscle torque production, Kadach S. et al, *Acta Physiologica*, 2023.

(7) Acute effects of a chewable beetroot-based supplement on cognitive performance, Vaccaro MG. et al, *European Journal of Nutrition*, 2024.

(8) The Role of Beetroot Ingredients in the Prevention of Alzheimer's Disease, Szymanski J. et al, *Applied Sciences*, 2023.

Venise
Les mystères de la dernière galère

Cette maquette conservée au Musée national de la marine à Paris intrigue les spécialistes : a-t-elle servi de modèle à la construction d'un navire ou est-elle simplement une représentation artistique ? Une conservatrice du musée a mené une enquête qui révèle un pan méconnu de l'épopée des galères marchandes de la Sérénissime.

Par Marine Benoit

▲ **Fabriquée à Venise en 1726,** cette maquette de plus de 2 mètres de long serait la reproduction au 1/24 de la dernière galère marchande de la cité-État, qui a navigué jusqu'au début du XVIIIe siècle. Sa figure de proue est un lion, emblème de la république de Venise.

Elle n'a *a priori* aucun petit rouleau de papier caché dans l'un de ses mâts. Elle ne mène pas non plus à un trésor. Pourtant, l'étrange maquette de galère vénitienne conservée dans les réserves du Musée national de la marine situé sur les hauteurs du Trocadéro, à Paris, aurait pu convaincre Tintin de se lancer dans l'une de ses enquêtes. Car ce petit bijou fait de bois, fabriqué à Venise en 1726 — comme l'indique l'inscription manuscrite présente sur le bordé — par des mains extraordinairement habiles, n'a cessé de dérouter les spécialistes de l'histoire de la navigation qui s'y sont intéressés. On l'a dit anachronique, structurellement irrationnel, voire en désaccord total avec l'histoire maritime européenne. Mais Camille Perez, conservatrice au Musée national de la marine, vient enfin d'en percer les mystères. Il faut bien comprendre que les anciennes maquettes de bateaux, aussi belles puissent-elles être à nos yeux, avaient avant tout une fonction pratique du temps où les flottes faisaient la puissance des États d'Europe occidentale. « *Il s'agit le plus souvent soit de maquettes d'arsenal, représentant des vaisseaux de ligne à différents stades de leur construction, destinées à guider les charpentiers navals, soit de modèles d'instruction à l'attention des princes ou des officiers de marine,* explique Camille Perez. *Dans le cas de la galère, difficile de savoir à quelle catégorie elle appartenait.* » Ce qui est certain, c'est que cette maquette est exceptionnelle à bien des égards, à commencer par sa date de fabrication. Rares sont les modèles qui nous ▸

BROWN UNIVERSITY LIBRARY / BRIDGEMANIMAGES

« Bucentaure », la galère d'apparat de la république de Venise. Chaque année, le doge de Venise embarquait à son bord pour fêter les noces de Venise et de la mer (gravure de A. Lazzari).

MUSÉE NATIONAL DE LA MARINE/G. DE CARVALHO

viennent du XVIIIe siècle, les plus précieux présents dans les collections de musées ayant été dans l'immense majorité fabriqués au XIXe siècle. « *Ce n'est pas qu'il n'y en a pas eu au XVIIIe siècle, mais ils ont presque tous disparu, souvent à cause de leur fragilité et de leur propension à être infestés par les insectes* », regrette la chercheuse. Le Musée national de la marine ne compte qu'une vingtaine de maquettes datées d'avant 1800 sur les plus de 3000 qui constituent sa collection. « *Très ponctuellement, nous en avons une du XVIIe siècle mais indéniablement, celles du début du XVIIIe siècle restent parmi les plus anciennes.* »

Des bâtiments à rames aisément manœuvrables

Au-delà de son âge, c'est bien le navire qu'elle représente qui fait de cette maquette un objet à part. Elle serait l'équivalent au 1/24 d'une galère de la Mercantia (« galeon di Mercantia », comme l'indique là encore l'inscription sur le bordé), magistrature vénitienne créée au début du XVIe siècle pour superviser les opérations commerciales maritimes et terrestres de la république de Venise. Apparues au XIIe siècle à Gênes et à Venise, les galères marchandes, longs et étroits bâtiments dotés à la fois de rames et de voiles, vont durant plusieurs siècles sillonner fièrement la Méditerranée, de Valence à Alexandrie en passant par Venise et Chypre. « *Les Génois et les Vénitiens avaient besoin de transporter des marchandises de luxe très rapidement et ont donc mis au point ces gros bateaux à rames qui se manœuvraient facilement dans les ports* », détaille André Zysberg, historien spécialiste de la navigation. Grâce à leurs rameurs leur permettant de naviguer même en l'absence de vent, elles sont d'une ponctualité sans faille, mais ont aussi l'immense avantage de pouvoir s'armer pour se défendre tout en étant dotées de grandes capacités de stockage. Face à tant d'avantages, les marchands s'y bousculent pour y placer leurs denrées. Venise, qui en fait construire de nombreuses aux XIIe et XIIIe siècles, en fait l'une de ses forces *(lire l'encadré ci-dessus)*. À leur bord, elles emportent des draps de laine, des savons, du riz ou encore des étoffes de soie teintes, et reviennent avec de la soie brute, des peaux de bêtes, des épices, de l'indigo, des tapis, du fromage ou du plomb.

« *Mais à partir du XVIe siècle, à Venise comme ailleurs, les marchandises vont être transportées par des vaisseaux ronds, qui constituent une évolution technologique importante* », précise André Zysberg. En effet, les embarcations à coque ronde, telles que les caraques ou les galions, sont capables d'acheminer des chargements encore plus importants à moindre coût, d'autant que leur gréement, associant de nombreuses voiles latines et carrées, attrape même le vent le plus doux et permet de se passer d'un équipage conséquent.

Ce qui nous ramène à notre maquette : pourquoi une galère marchande aurait-elle navigué au XVIIIe siècle, soit plus de deux siècles après le début du déclin de ces modèles de navires ? Jean Destrem (1842-1929), lui aussi conservateur du Musée national de la marine, préféra tout bonnement éluder la question lorsqu'il rédigea le tout premier catalogue des collections. Le modèle réduit devra attendre plus de quatre-

C. PEREZ

« Cette galère vénitienne a bien sillonné les mers. Elle est tout simplement l'une des dernières galères de l'histoire »

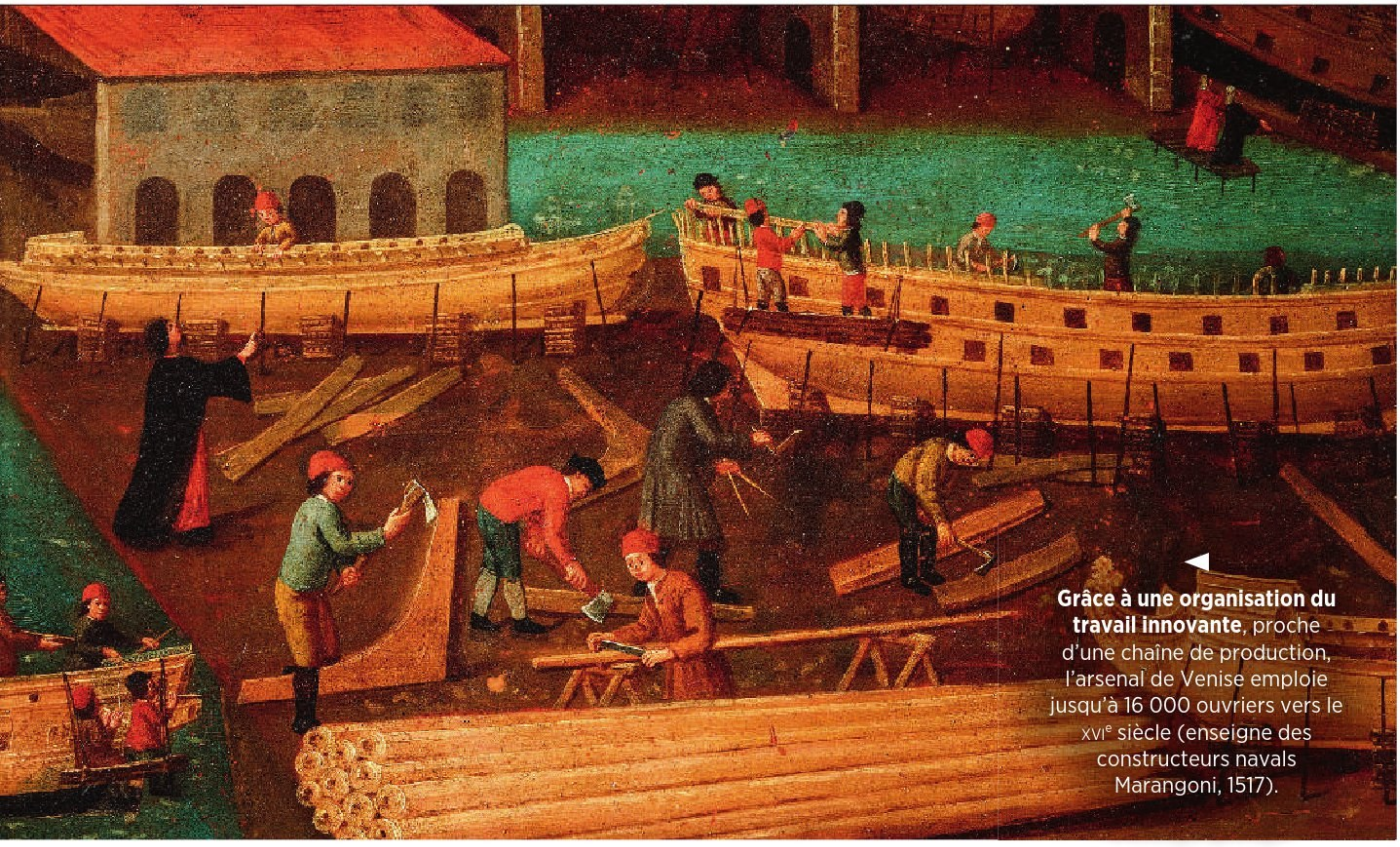
Camille Perez, conservatrice au Musée national de la marine, à Paris

ARSENAL

Au cœur de la puissance de Venise

Largement tournée vers la mer, Venise fit en toute logique de ses flottes militaires et marchandes le cœur de sa puissance militaire et économique. L'arsenal, aussi appelé arsenal de la République sérénissime, immense complexe dont certains bâtiments avaient des allures de cathédrale (à l'instar de la Grande Corderie, aujourd'hui disparue), est justement le lieu où ont été produits ces navires dès 1104. Ceint par 3 kilomètres de murailles de briques rouges, il emploie jusqu'à 16 000 ouvriers à son apogée, vers le XVIe siècle. Pour ses dimensions gigantesques et son organisation du travail d'un genre nouveau, comparable à de véritables chaînes de production, il sera considéré comme l'un des premiers sites véritablement « industriels » apparus en Europe.

Aujourd'hui, une partie de ses installations, qui se visitent, est dévolue à la Biennale de Venise, l'une des plus grandes manifestations d'art contemporain dans le monde.



Grâce à une organisation du travail innovante, proche d'une chaîne de production, l'arsenal de Venise emploie jusqu'à 16 000 ouvriers vers le XVIe siècle (enseigne des constructeurs navals Marangoni, 1517).

NPL/OPALE PHOTO

vingts ans pour qu'on s'y intéresse à nouveau. À l'occasion de l'exposition « Quand voguaient les galères », organisée par le musée en 1990, les historiens se risquèrent cette fois à souligner l'incohérence entre la date indiquée sur le bordé et l'histoire de ces embarcations. En l'an 2000, le spécialiste de l'architecture navale ancienne René Burlet se lança enfin dans une analyse plus poussée de l'objet. Selon lui, de nombreux éléments de structure sont aberrants, en particulier au niveau des gaillards avant et arrière (les parties surélevées du navire placées au-dessus du pont supérieur). Il estime notamment que les sabords installés à ces endroits ne peuvent recevoir de canons sans remettre en cause la viabilité du navire. *« Plusieurs incohérences ont poussé René Burlet à en conclure que cette galère n'avait jamais existé. Il y voyait là une belle réalisation, mais en tel décalage avec sa période qu'elle ne pouvait être qu'une chimère »*, affirme Camille Perez qui, au terme d'une enquête de plusieurs mois menée entre la réserve du Musée national de la marine, en région parisienne, et les archives de Venise, en Italie, est parvenue à rectifier l'erreur de son aîné. *« En réalité, cette galère vénitienne a bien été conçue et a sillonné les mers. Elle est tout simplement l'une des dernières galères de l'histoire »*, assure l'historienne, dont les conclusions ont été publiées dans la revue scientifique *e-Phaïstos*.

Un mystérieux collectionneur l'aurait rapportée à Toulon

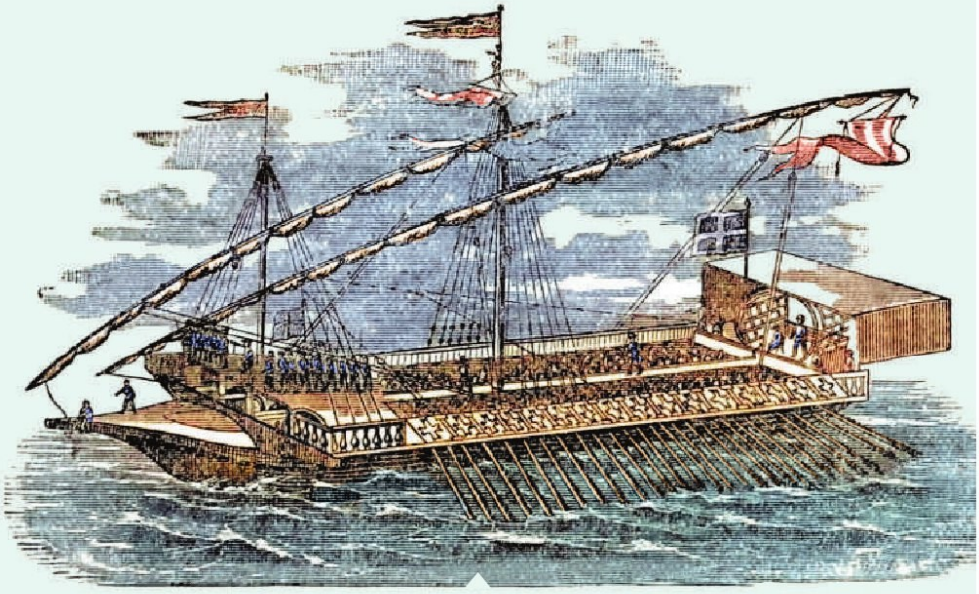
Le fonctionnement même de la petite république expliquerait pourquoi la cité-État a continué à faire construire des galères marchandes pour les envoyer en Adriatique à une époque où elles n'avaient plus rien de rentable. *« Venise, qui a su résister aux corruptions, est devenue une anomalie dans le paysage politique. Et même si elle n'arrive plus vraiment à défendre son territoire, elle joue la carte de la permanence. Elle sait qu'elle est unique et elle souhaite continuer à écrire sa propre histoire »*, avance Camille Perez. De la même manière, Venise continua durant de longs siècles à construire des palais gothiques, alors même que la Renaissance était largement passée par là. *« Tout est fait pour maintenir coûte que coûte cette ligne maritime, même si elle nécessite des capitaux considérables et n'a rien de lucratif »*, poursuit Camille Perez. Les archives nous disent que peu après 1714, les actes concernant la galère de la Mercantia cessent. En 1718, le Sénat écrit une dernière fois que sa réintroduction sur les eaux serait bienvenue, à l'heure où plus aucun marchand ne souhaite s'y engager. *« Le silence qui suit ce dernier acte montre bien que ce souhait est resté un vœu pieux »*, conclut la conservatrice. Ainsi disparaît cette dernière galère marchande.

Une question subsiste néanmoins. Comment cette maquette, dont on sait qu'elle se trouvait à l'arsenal de Venise — *« sans doute pour en conser-*

NAVIGATION

Une vie de galérien

L'expression « quelle galère » laisse entendre que la vie de rameur sur un tel navire ne devait pas être des plus agréables. À raison ! « *Les galériens avaient un quotidien épouvantable* », confirme l'historien spécialiste de la navigation André Zysberg. « *Ils passaient l'immense majorité de leur temps sur le pont, qu'il vente ou qu'il pleuve, au milieu des cordages et des vivres, composés de haricots et de pain.* » Lorsqu'ils ramaient, ils étaient entassés à 50 sur à peine une vingtaine de rangées de rames, forcés de fournir des efforts considérables pour se hisser sur l'escabeau qui leur permettait, en se basculant en arrière du haut de celui-ci, de fournir la poussée nécessaire pour faire avancer le bateau. « *Ils se cassaient le corps en arrière dans un va-et-vient perpétuel* », poursuit l'historien. Contrairement à l'idée véhiculée par la culture populaire, ces galériens étaient loin d'être tous des esclaves, et pouvaient être divisés en trois catégories distinctes : les *bonevoglie*, soit les volontaires, « *des gens assez misérables pour s'enrôler sur les galères* » ; les détenus que l'on extrayait des prisons et à qui l'on promettait une relative liberté ; et enfin les esclaves, généralement raflés par les corsaires dans l'Empire ottoman.



Les rameurs, volontaires, anciens détenus ou esclaves, connaissaient des conditions de vie et d'hygiène épouvantables (gravure d'Edward Shippen, 1883).

AKG IMAGES

ver le souvenir au moment où elle a été démembrée », avance Camille Perez — s'est-elle retrouvée dans les réserves du musée français ? La conservatrice a sa petite idée. En mai 1797, le général Bonaparte fait déposer le dernier doge et met fin à la république de Venise. En janvier de l'année suivante, juste avant de quitter la ville qui doit être livrée aux Autrichiens, les Français saccagent l'arsenal, détruisant tout ce qui ne peut pas être emporté. Napoléon réquisitionne la dernière frégate construite par l'arsenal, la rebaptise la *Muiron* et fait voile à son bord vers Toulon, d'où il rejoint ensuite Paris par voie terrestre. « *Or, la maquette de la galère vénitienne est attestée pour la première fois en France à Toulon à la même période. René Burlet attribue sa présence sur place à un mystérieux collectionneur de goût qui l'aurait achetée à Venise et apportée à Toulon, puis laissée là* », raconte Camille Perez. Parce qu'il est aussi avéré que Bonaparte était sensible au charme des maquettes de bateaux, celle de la galère aurait peut-être voyagé avec lui sur la *Muiron*. « *Nous savons qu'il a fait fabriquer un modèle de la* Muiron *et qu'il l'a gardé toute sa vie auprès de lui, dans sa chambre ou dans son cabinet de travail* », note-t-elle. Ce modèle, d'ailleurs, est lui aussi conservé au Musée national de la marine.

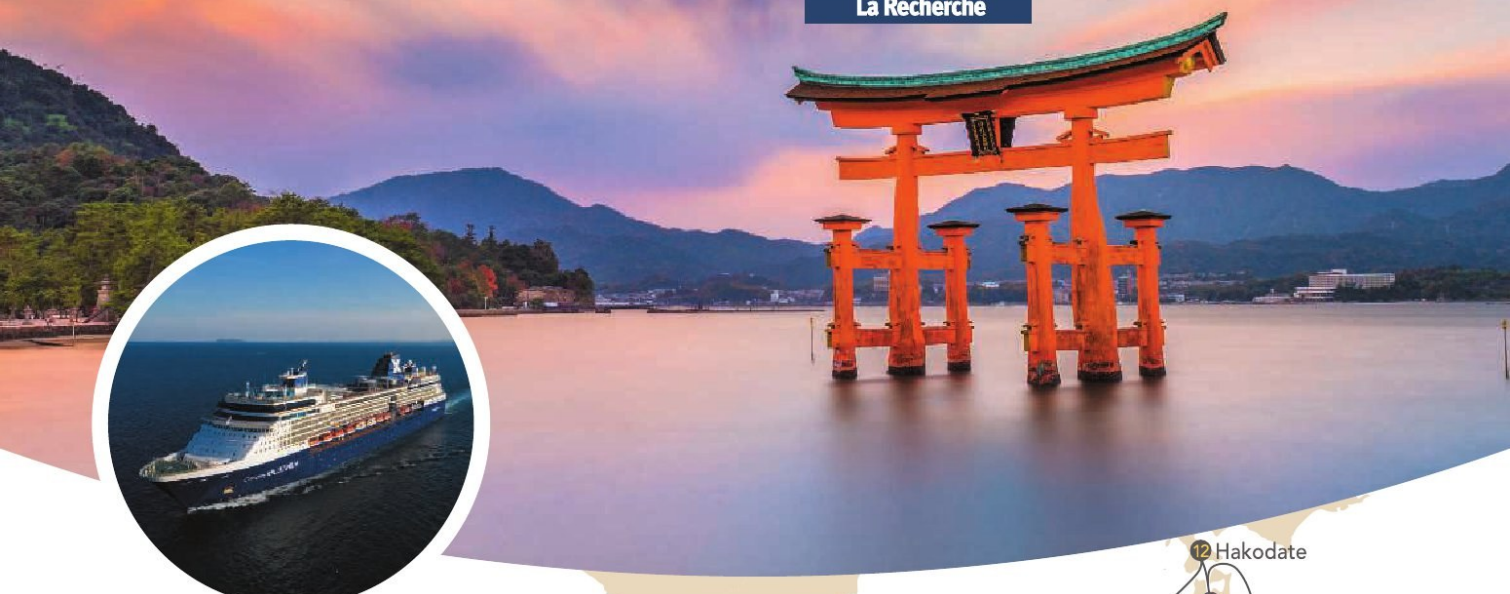
On l'a dit, cette drôle de maquette ne menait pas à un trésor. Mais découvrir grâce à un seul objet qu'une puissance comme Venise a tenté de faire voguer envers et contre tout, jusqu'au XVIIIe siècle, des navires sortis tout droit du Moyen Âge, en est assurément un petit pour les historiens. ■

CROISIÈRE SCIENCES ET AVENIR

JAPON, ARCHIPEL AUX TRÉSORS

par Voyages d'exception

en partenariat avec SCIENCES ET AVENIR La Recherche



Embarquez pour une croisière unique en partenariat avec **Sciences et Avenir**, à bord du Celebrity Millenium, sur les côtes des îles fascinantes du **Japon**. Vous explorerez les sites incontournables de l'archipel, en compagnie de vos conférenciers **Chantal Forest** et **Emmanuel Le Bret**.

Du 4 au 20 octobre 2024

Dès **6 490 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

*Prix incluant une remise de 500€/pers. pour toute réservation. CGV disponibles sur notre site. Photos : ©Shutterstock, ©Celebrity.

Scannez ce QR code pour télécharger la brochure

Réservations et informations

Tel : 01 75 77 87 48 | contact@voyages-exception.fr

voyages-exception.fr/brochures (code SCJAP) | ou dans votre agence de voyage

WWW.VOYAGES-EXCEPTION.FR

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

Les révélations de l'homme de Vittrup

L'analyse génétique des restes de cet homme préhistorique, retrouvé dans une tourbière en 1915, apporte un éclairage nouveau sur les trois groupes culturels qui cohabitaient au Danemark durant la période néolithique.

En 1915, les restes d'un homme préhistorique sont retrouvés dans une tourbière, près de Vittrup, dans le nord-ouest du Danemark, constitués d'un os de la cheville, d'un tibia, d'une mâchoire et d'un crâne fracturé en plusieurs morceaux. Tout laissait à penser que celui que l'on dénomme désormais « l'homme de Vittrup » avait connu une mort violente. Un peu plus d'un siècle après, l'enquête est relancée par une équipe de chercheurs réunis autour du paléogénéticien Eske Willerslev, de l'institut du Globe de l'université de Copenhague (Danemark), dans le cadre d'une série d'études sur les vagues de peuplement de l'Eurasie au mésolithique et au néolithique. Parmi les 300 individus préhistoriques examinés, l'homme de Vittrup a particulièrement attiré leur attention *« car il se distingue sur le plan génétique »*, nous apprend Karl-Göran Sjögren, archéologue à l'université de Göteborg (Suède) : son génome indique en effet qu'il n'est pas originaire de la région où son corps a été retrouvé.

BRUNO BOURGEOIS

Ses restes ont été soumis à une batterie complète d'analyses. L'observation des os et des dents permet d'établir qu'il était probablement âgé d'une trentaine d'années au moment de son décès, et que celui-ci a été provoqué par au moins huit coups portés sur son crâne — peut-être à l'aide de la massue en bois retrouvée tout près dans la tourbière. La datation au radiocarbone des ossements indique qu'il a été mis à mort entre 3345 et 3082 avant notre ère. À cette époque (entre 3900 et 2800 avant notre ère), c'est la culture néolithique dite des vases à entonnoir qui domine au Danemark. Résultant de l'arrivée dans le sud de la Scandinavie d'agriculteurs ayant des ancêtres anatoliens, elle se caractérise non seulement par la nouvelle forme de céramiques qui lui donne son nom, mais aussi par un renouveau de l'industrie lithique et des constructions funéraires monumentales : des « tombes à couloir ».

Dans un deuxième temps, les chercheurs s'attellent à reconstituer l'ascendance génétique du mystérieux défunt : l'homme de Vittrup, comme un autre individu retrouvé à Svinninge Vejle (sur la grande île danoise de Seeland), est lié aux chasseurs-cueilleurs norvégiens et suédois du mésolithique, sans apport récent des agriculteurs d'origine anatolienne. Ils en concluent que les deux

STEPHEN FREIHEIT-FISCHER ET AL., 2024, PLOS ONE - JOHN LEE, DANISH NATIONAL MUSEUM - FISCHER ET AL., 2024, PLOS ONE

Cette massue en bois retrouvée près du corps pourrait être l'arme du crime.

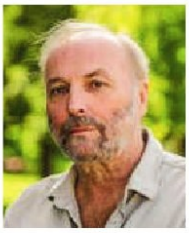
Le crâne de l'individu, âgé d'une trentaine d'années lors de sa mise à mort entre 3345 et 3082 avant notre ère, a été fracturé par au moins huit coups.

individus ont *« migré au Danemark depuis le Nord, à partir d'une région non affectée par l'ascendance des fermiers néolithiques. »*

Lorsque des groupes d'agriculteurs issus de migrants anatoliens sont arrivés dans le Jutland à partir de 3900 avant notre ère, les chasseurs-cueilleurs indigènes du mésolithique ont brutalement disparu *(lire l'encadré p. 84). « L'homme de Vittrup n'en était pas le descendant,* souligne Karl-Göran Sjögren. *D'une part, parce qu'il a vécu quelque 700 à 800 ans après cette migration de fermiers, d'autre part, parce qu'ils sont génétiquement différents. »* Les nouveaux arrivants ont certes peuplé tout le Danemark, mais ils ne se sont jamais aventurés dans l'ensemble de la péninsule scandinave, même s'ils ont gagné des régions au-delà de Stockholm et d'Oslo. Certains chasseurs-cueilleurs mésolithiques ont donc pu subsister au nord de leur zone d'habitat — les preuves archéologiques manquent néanmoins pour le prouver. À certains endroits enfin, comme sur l'île suédoise de Gotland, au sud-est de la péninsule scandinave, les deux groupes se sont mélangés, donnant lieu à la culture dite de la céramique perforée. Ainsi que le résument les chercheurs, il y a 5000 ans, *« le sud de la Scandinavie était habité par au moins trois populations ayant des économies et des ascendances génétiques différentes : au sud, des groupes de la culture des vases à entonnoir descendant d'agriculteurs européens ; au nord, des chasseurs-cueilleurs ayant des ascendances mésolithiques purement locales ; et entre les deux, des groupes de la culture de la céramique perforée caractérisés par des ascendances mixtes de chasseurs-cueilleurs scandinaves et d'agriculteurs européens. »*

L'homme de Vittrup venait-il donc d'aussi loin que le nord de la Scandinavie ? Pour le savoir, les chercheurs se sont tournés vers des analyses isotopiques leur permettant de reconstituer ▸

son régime alimentaire et l'environnement dans lequel il a vécu. Les isotopes du strontium et de l'oxygène déposés sur l'émail de ses dents indiquent qu'il a grandi jusqu'à l'âge de 9-12 ans dans une région côtière septentrionale, sans doute le nord-ouest de la Norvège, voire la région du cercle arctique, avant de migrer vers un territoire plus chaud : *« Les isotopes de l'oxygène dans l'une de ses dents suggèrent un climat plus froid ; les isotopes alimentaires (carbone et azote) suggèrent un régime marin dans son enfance, et les isotopes de strontium de son enfance sont trop faibles pour correspondre au nord de la Suède ou de la Finlande »*, précise ainsi Karl-Göran Sjögren. Pour savoir ce qu'il a mangé à l'âge adulte, les chercheurs ont mesuré ces mêmes isotopes dans le collagène osseux : ils sont présents en même quantité que dans les squelettes de la culture des vases à entonnoir du Danemark. Ils en déduisent une importante modification de son régime alimentaire, incluant plus de végétaux, ce qui suggère un mode de vie semblable à celui des agriculteurs.


UNIVERSITY OF GOTHENBURG

« Les isotopes de l'oxygène dans l'une de ses dents suggèrent qu'il a habité dans un climat plus froid »

Karl-Göran Sjögren, archéologue à l'université de Göteborg (Suède)

Reste à expliquer comment un chasseur-cueilleur pouvait se trouver à des centaines de kilomètres de son lieu de naissance, dans une population d'agriculteurs. Son long voyage, sans doute effectué par la mer, s'est très certainement déroulé dans un contexte de relations commerciales entre le nord du Jutland et la péninsule scandinave. On sait qu'elles étaient centrées sur des échanges de silex, de basalte et d'ardoise pour fabriquer des outils et des armes (haches, couteaux, herminettes ou pointes de flèche). Plusieurs possibilités sont alors envisageables : l'homme de Vittrup pouvait être impliqué dans ce commerce, s'installant de son plein gré dans le nord du Danemark, où il se serait intégré à la culture des agriculteurs. Pour Karl-Göran Sjögren c'est *« l'option la plus séduisante, puisqu'il a vécu de nombreuses années au Danemark, apparemment dans les mêmes conditions que les indigènes de la région. »*

Une période caractérisée par les pratiques sacrificielles

Mais il pourrait aussi s'agir d'un prisonnier, capturé en raison de ses compétences maritimes, qui aurait travaillé en tant qu'esclave pour un groupe de fermiers. Quant à sa fin, elle est probablement survenue dans le cadre d'un sacrifice, car à cette période, la pratique connaît son apogée, avec moult dépôts de valeur (humains, animaux, haches, poteries…) dans les fjords et les marais. Portées par un objet contondant, les fractures ovales de son crâne ont été mortelles. Et pourtant, l'homme de Vittrup a fini ses jours dans un paisible paysage, marqué, à l'époque, par les dépôts rituels et les constructions mégalithiques. ■ **Sara de Lacerda**

MIGRATIONS

Les Danois, descendants des pasteurs yamnayas

La péninsule scandinave a d'abord été colonisée à la faveur de deux vagues migratoires, l'une venue du Sud, constituée de chasseurs-cueilleurs d'Europe occidentale, et l'autre venue de l'Extrême-Nord, constituée de chasseurs-cueilleurs d'Europe orientale. Vers 3900 avant notre ère, c'est-à-dire plus d'un millénaire après la transition néolithique en Europe centrale, l'introduction de l'agriculture au Danemark a été associée à un renouvellement radical de la population par des descendants d'agriculteurs anatoliens. Mille ans plus tard, vers 3000-2800 avant notre ère, une deuxième vague de migrations, cette fois accomplie par des Yamnayas, des pasteurs en provenance de la steppe pontique-caspienne, vient à nouveau bouleverser le patrimoine génétique local. Les données génomiques de 100 individus de la fin du néolithique et du début de l'âge du bronze ont en effet permis d'établir que leur ascendance est majoritairement liée à ces groupes yamnayas (à hauteur de 60 à 85 %), entre 10 et 23 % à des agriculteurs d'Europe centrale, et entre 3 et 18 % aux agriculteurs locaux du néolithique. Comme ils sont les ancêtres des Scandinaves — ainsi que des Anglo-Saxons et des Goths dans les régions voisines —, cela signifie que *« dans la population actuelle, il n'existe plus de trace des populations de chasseurs-cueilleurs ayant existé dans la péninsule au mésolithique et sans doute encore dans les régions septentrionales au néolithique »*, conclut Karl-Göran Sjögren, archéologue à l'université de Göteborg (Suède).

PROFITEZ D'UNE REMISE DE 20% SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET AVEC LE CODE PROMO SA-VT24

VIVA TECHNOLOGY

LE PLUS GRAND ÉVÉNEMENT STARTUP ET TECH EN EUROPE

22-25 MAI PARIS 2024

RENCONTREZ LES LEADERS DE LA TECH

YANN LECUN
VICE-PRÉSIDENT &
SCIENTIFIQUE EN CHEF DE L'IA
META

MARIE EKELAND,
FONDATRICE & PDG
2050

ARTHUR MENSCH
CO-FONDATEUR & PDG
MISTRAL AI

RÉSERVEZ VOTRE BILLET SUR WWW.VIVATECH.COM

CO-ORGANISATEURS — PUBLICIS GROUPE — Groupe Les Echos Le Parisien

PARTENAIRES MÉDIAS — franceinfo: — africa news. — euronews. — Bloomberg Media — CGTN — CNN — GAME ONE — webedia — BFM BUSINESS

Léonard de Vinci, anatomiste de génie

Les recherches anatomiques de Léonard de Vinci fascinent encore aujourd'hui car l'artiste de la Renaissance ne reculait devant rien pour chercher à percer les mystères du vivant. Celui qui se vantait d'avoir disséqué 30 cadavres au cours de son existence a contribué largement à améliorer la connaissance du corps humain.

Par Pascal Brioist

Léonard déterrant de nuit clandestinement des cadavres de condamnés à mort pour se livrer à des expériences de dissection, voilà une image qui perdure et qui pourtant ne correspond pas à la réalité : tous ses travaux anatomiques ont en effet été réalisés au vu et au su des autorités ecclésiastiques et médicales, dans des hôpitaux, souvent même en présence de médecins. Ce n'est que tardivement (1514) qu'il rencontra des problèmes avec la papauté et qu'on le pria de renoncer à ses expériences. Il défendait des idées en contradiction avec celles de l'Église sur l'âme du fœtus. Pourtant, en 1517, quand le cardinal Louis d'Aragon vint lui rendre visite au Clos-Lucé à Amboise, il n'hésita pas à montrer le fruit de ses recherches anatomiques à ce grand prince ecclésiastique. Et même à se vanter d'avoir disséqué au cours de son existence 30 cadavres, preuve que le sujet n'était pas tabou. Le secrétaire du cardinal, Antonio de Beatis, témoigne : *« Ce gentilhomme a composé un ouvrage sur l'anatomie appliquée spécialement à l'étude de la peinture, aussi bien des membres que des muscles, des nerfs, des veines, des jointures, des intestins et de tout ce qui peut s'expliquer tant sur le corps des hommes que sur celui des femmes ; on n'en a jamais fait de semblable. »*

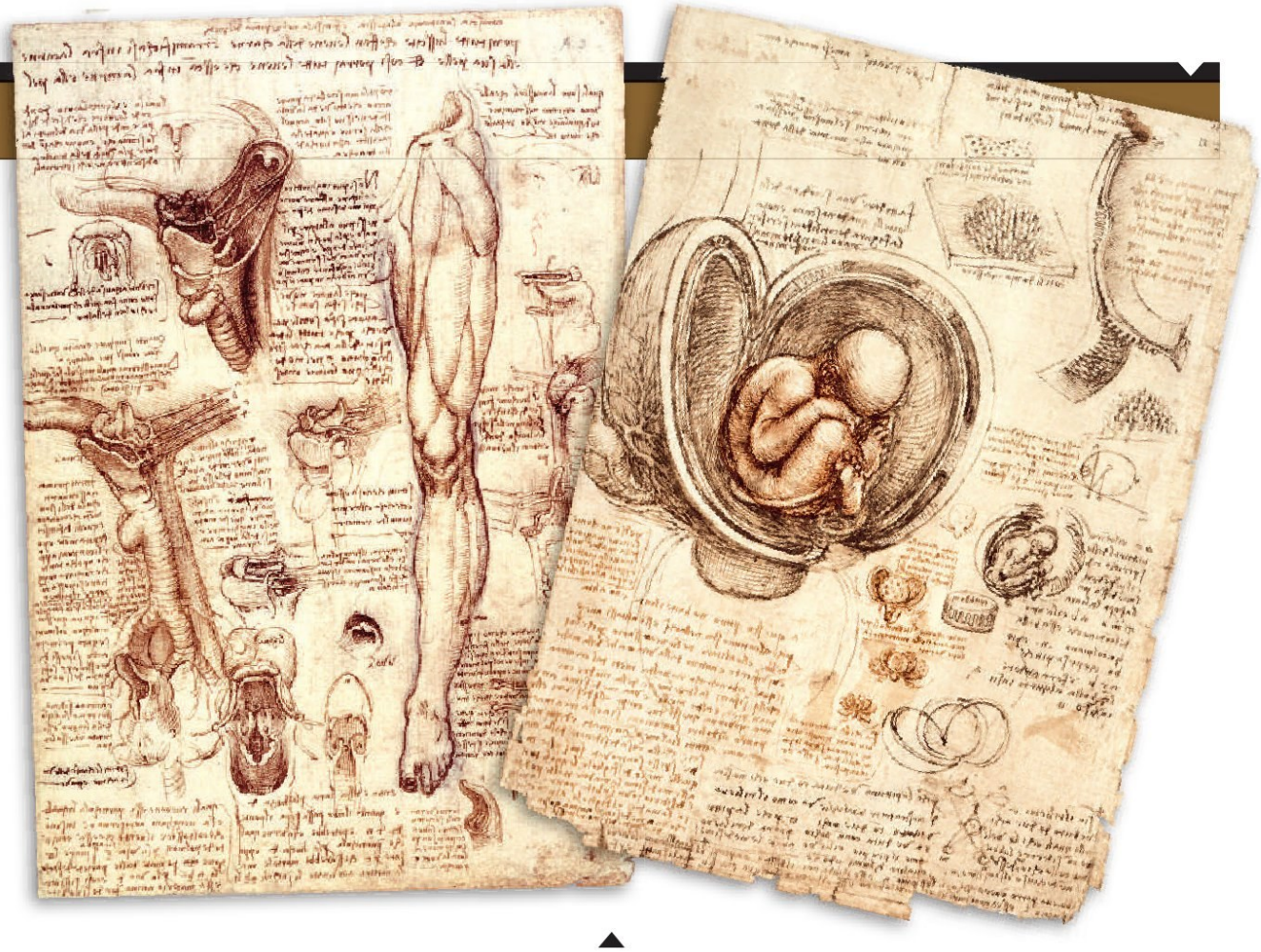
Il serait tout aussi erroné de considérer que Léonard s'est contenté de l'observation pour produire ses dessins sans aucun recours à la culture des médecins de son temps. À Pavie, vers 1483, il est en contact avec Pier Andrea Marliani et Fazio Cardano. À Florence entre 1506 et 1507, il dissèque à l'hôpital Santa Maria Nuova, puis en 1509, de retour à Pavie avec le jeune galéniste Marcantonio della Torre.

En fréquentant de tels personnages, Léonard fut convaincu de l'importance de lectures spécialisées et il acquit des ouvrages majeurs sur le sujet. La base était tout d'abord philosophique. D'Aristote, il étudie par exemple le traité *De l'âme* qui distingue une âme organique, à l'origine de la capacité vitale, une âme végétative, à l'origine de la faculté génératrice et de la croissance du corps, une âme sensitive qui induit la perception, les mouvements involontaires et les émotions, et enfin l'âme intellective qui détermine notre conscience. Du même Aristote, il emprunte les idées sur la génération des animaux et aussi les concepts de la physiognomonie selon laquelle on trouve des échos de ressemblance entre le monde animal et le genre humain.

D'autres lectures, notamment celle des livres de Nicolas de Cues (1401-1464), convainquent Léonard de l'existence d'une harmonie entre le macrocosme de l'Univers et le microcosme du corps. C'est ainsi qu'il est fasciné par les paral-

P. MATSAS/OPALE

Historien au Centre d'études supérieures de la Renaissance à l'université de Tours, Pascal Brioist est spécialiste de Léonard de Vinci.



AKG IMAGE

Études anatomiques de Léonard de Vinci : langue, gorge, larynx et œsophage, musculature de la jambe, fœtus dans l'utérus. Les dessins sont accompagnés de textes où le savant détaille sa compréhension et ses constatations sur leur fonctionnement.

lèles offerts entre les vaisseaux sanguins, les rivières ou les branches des arbres dans leurs structures arborescentes. Il considère aussi que tout comme l'eau est capable de grimper au sommet des montagnes, le sang peut parvenir au sommet du crâne et jaillir lors d'une blessure à la tête.

Du médecin romain Claude Galien (131-201), aux idées desquelles Léonard a accès par Marcantonio della Torre, il emprunte une méthode descriptive qui fait correspondre à chaque forme anatomique une fonction, depuis les composantes du corps (muscles, nerfs, os) jusqu'aux parties composées (bras, épaule…). Il emprunte aussi la théorie des humeurs que l'on enseigne dans les universités médiévales : chaque liquide présent dans le corps (sang, flegme, bile jaune, bile noire) est produit par un organe (cœur, cerveau, foie, rate), relève d'un élément (air, eau, feu, terre) caractérisé par deux qualités (chaud ou froid, humide ou sec) et détermine un tempérament (sanguin, flegmatique, colérique, mélancolique). Rien ne pouvait être pensé en dehors de ces catégories car toute maladie était liée à un déséquilibre des humeurs.

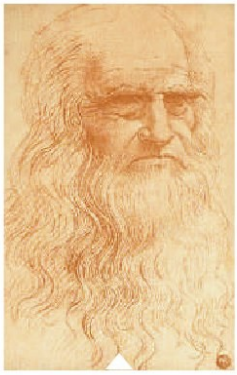
Une bibliothèque remplie d'ouvrages de méthodes de dissection

Léonard dispose également dans sa bibliothèque d'ouvrages de prédécesseurs évoquant des méthodes de dissection. Chaque ouvrage présentait sa méthode pour l'acte nécessairement destructeur de découper un corps, mais avait aussi ses propres particularités : parler des éléments anatomiques et les mesurer, évoquer les viscères ou le cerveau, décrire la « roue des urines » permettant de diagnostiquer les maladies, etc. Cependant, Léonard ne se contente pas de répéter. Il invente une méthode originale, souvent en transposant des savoir-faire des domaines auxquels il a été formé : le dessin bien sûr, mais aussi la sculpture, pour mesurer les dimensions et les volumes, la mécanique pour comprendre les articulations et les mouvements, l'hydraulique pour le système urinaire, la fonderie à la cire perdue pour reproduire la forme des cavités crâniennes, des maquettes fonctionnelles pour analyser l'œil, le poumon ou le cœur…

Les percées de Léonard ne viennent pas seulement de l'exactitude de ses merveilleux dessins, mais de son approche des fonctions des parties du corps

Si au départ, la méthode analytique de la dissection s'inspire de Galien, en procédant par couches successives des composantes du corps, ce que l'on voit bien dans les planches représentant la main (de la peau au squelette en passant par les tendons, les nerfs, les vaisseaux et les muscles), il propose aussi des approches nouvelles. Ainsi, il dissèque une jambe en la sectionnant tranche par tranche, montrant la musculature de la cuisse, obtenant une image proche de ce que l'on verrait aujourd'hui grâce à un scanner ou une IRM. Il tourne aussi autour du corps en multipliant les vues, comme il le faisait dans l'atelier d'Andrea del Verrocchio, son maître fondeur. Une planche montre quatre vues successives du système bras-épaule et indique qu'il faut multiplier les points de vue perspectifs. Afin de rendre compte de la biomécanique du corps humain, il utilise des fils de laiton ou de laine pour imiter les tendons et faire bouger les os tels des éléments de marionnettes, il explique comment démonter le tibia des os de la cheville ou encore compare les muscles du cou à des haubans. Il est le premier à avoir représenté avec exactitude la colonne vertébrale comme un empilement de pièces squelettiques articulées.

Les percées de Léonard ne viennent pas seulement de l'exactitude de ses merveilleux dessins, elles viennent de son approche des fonctions des parties du corps fondée sur sa compréhension aristotélicienne de ce qu'est le vivant : la circulation d'esprits vitaux dans le corps par le biais du sang. Le fait que le siège de l'âme soit le cerveau pousse Léonard à analyser en détail l'anatomie de ce dernier, car c'est là que sont traitées les informations produites par les sens. Il repère ainsi le nerf optique et se sert de ce qu'il sait de la médecine arabe (Alhazen, 965-1040) pour enquêter sur le fonctionnement de la vue, un sens fondamental pour son activité de peintre et de spécialiste de la perspective. Il repère que les lignes des rayons partis des objets se croisent au niveau de la pupille puis divergent à l'arrière de celle-ci, comme dans une boîte noire, et, selon lui, sont rétablies à l'endroit par le cristallin pour le nerf optique. Léonard s'intéresse également à la digestion, à l'urologie, à la respiration, à la gestion du flux sanguin par le cœur, à la reproduction ainsi qu'à l'embryologie.



AKG IMAGES

Léonard de Vinci (1452-1519). Autoportrait présumé de l'artiste vers 1515.

Il parvient même à déceler la cause de la mort de ses sujets

Parmi les planches les plus impressionnantes dessinées par le maître se trouvent ainsi les dessins du *codex Windsor* sur le fœtus d'une femme morte en couches. Léonard pensait que les semences d'une nouvelle vie humaine se trouvaient de façon équivalente dans l'homme et dans la femme. Il déduisait de ses observations sur les membranes utérines, le placenta, le liquide amniotique et les organes du fœtus que c'est la mère qui lui insuffle la vie puisqu'il n'est pas nécessaire au fœtus de respirer. Cette approche tout expérimentale choque ses contemporains, en particulier l'Église pour laquelle la vie est donnée par Dieu dès le début de la grossesse.

Il est impossible de résumer plus avant les recherches médicales de Léonard qui ne fut assurément pas un médecin mais qui cherchait à percer les mystères du vivant, quitte à se confronter à la présence terrifiante de la mort et de cadavres qu'on ne pouvait guère alors conserver plus de quelques jours. Il lui arrive pourtant de déceler parfois les causes de la mort de ses sujets, et on lui prête même l'identification de carcinomes. On a longtemps cru que l'anatomie servait à Léonard pour sa peinture, et on voyait par exemple dans le tableau *Saint Jérôme* la preuve de cette relation. Mais tous les dessins anatomiques qui auraient pu servir au *Saint Jérôme* lui sont en réalité postérieurs et datent de 1509-1510. On ne peut tricher avec la chronologie. ■

EXPÉRIMENTATION

La cardiologie en maquette

La description du cœur par Léonard dérive au départ de Claude Galien, qui pensait que le sang veineux venait du foie. Puis était envoyé dans le ventricule droit par l'effet de pompe du muscle cardiaque, puis passait dans le ventricule gauche par des trous de la paroi ventriculaire et se transformait en *« esprits vitaux »* en se mélangeant à l'air venu des poumons. En vérité, les pores intraventriculaires que Léonard dessine n'existent pas. Ce n'est qu'un peu plus tard, en 1513, en disséquant un cœur de bœuf, qu'il se rend compte de son erreur et commence à s'intéresser à la valve aortique, au profil très géométrique, par où le sang sort de la chambre cardiaque. Le savant commence alors à penser que c'est le cœur et non le foie qui est à l'origine du flux sanguin. Ce dernier se réchauffe car la valve le propulse en tourbillons. Pour en être certain, Léonard produit un modèle du cœur en verre et de la fameuse valve. Pour visualiser les tourbillons du liquide propulsé par un soufflet, l'expérimentateur y mélange des grains de millet et peut dessiner les turbulences. En 2019, la reconstitution du phénomène a été reproduite en maquette avec une modélisation électronique par les chercheurs de Caltech, aux États-Unis.

25 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Le ciel du mois
p. 97

▶ Jeux
p. 98

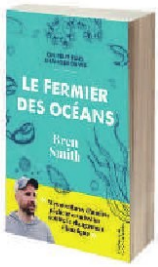
BILL WADMAN

Bren Smith est passé de la pêche intensive à un modèle respectueux de l'océan (ici en 2017).

Pour une aquaculture raisonnée

« Le Fermier des océans » est un récit autobiographique saisissant qui donne toute la mesure du pillage des ressources marines tout en proposant des solutions.

CONVERSION Une trajectoire de vie cabossée qui l'a amené à créer un modèle de ferme marine repris aujourd'hui par quelque 10000 nouveaux fermiers : tel est le récit passionnant que nous livre ici l'Américain Bren Smith. Il naît dans un village de Terre-Neuve, au Canada, une île de pêcheurs qui l'habitera toute sa vie. Lorsque sa famille déménage aux États-Unis, il perd ses repères et quitte l'école à 14 ans. Après une période chaotique, il devient à 17 ans pêcheur en Alaska. Les années 1980, *« celles des harengs fourrés à l'héroïne »*, qui permettent de payer les factures, sont aussi celles de l'industrialisation des océans, qui transforme le petit pêcheur en pilleur globalisé : *« Pour satisfaire les envies voraces de* junk food, *on broyait des écosystèmes entiers à coups de chalut. »*



Dix ans plus tard, l'effondrement des stocks de morue finit par mettre les pêcheurs au chômage. Bren Smith s'essaie ensuite à l'aquaculture — un véritable « cauchemar environnemental », qui nécessite 10 kg de poissons sauvages pour obtenir un kilo de saumon d'élevage — avant de trouver sa voie dans l'ostréiculture. Mais, après le passage de deux ouragans qui ravagent son exploitation, il décide de diversifier sa production, alliant algues et divers mollusques indigènes. Reste à persuader les consommateurs de manger ses « légumes de la mer ». Il va pour cela embarquer dans l'aventure de grands chefs cuisiniers et gagner peu à peu son pari en offrant une solution pour nourrir les 9,8 milliards d'individus qui composeront la population mondiale en 2050, tout en respectant l'océan. ■

Sylvie Rouat

Le Fermier des océans, Bren Smith, Éd. L'arbre Qui Marche, 320 p., 21,90 €

Égyptomanie

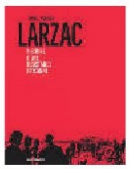
DÉMYTHIFICATION Le préhistorien et mythologue Jean-Loïc Le Quellec s'attelle

à décrypter les idées reçues et autres illusions liées à l'Égypte antique. Si certains « rêveurs » sont convaincus que les Égyptiens ont découvert l'Amérique ou qu'ils sont les inventeurs du boomerang aborigène australien, l'auteur rappelle que d'autres n'hésitent pas à puiser dans la grandeur de cette civilisation antique pour servir leurs idéologies. Un livre sur le pouvoir de l'histoire, surtout lorsqu'elle est remaniée. ■ **M. B.**

Nos ancêtres les pharaons : cinq siècles d'illusions sur l'Égypte antique, Jean-Loïc Le Quellec, éditions du Détour, 280 p., 22,90 €

Résistance paysanne

BD En 1971, l'annonce de l'extension du camp militaire du plateau du Larzac menace d'expropriation de nombreux agriculteurs. Très vite, une poignée d'entre eux organise une résistance qui va durer dix ans et mobiliser peu à peu des centaines de milliers de personnes, une foule hétéroclite venue de toute la

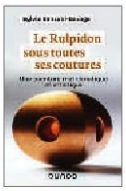


France, qui découvre ces âpres terres peuplées de brebis. Cette épopée humaine dédiée à la préservation d'un certain monde rural est très bien documentée dans cette bande dessinée ponctuée de photographies. ■ **S. R.**

Larzac, histoire d'une résistance paysanne, Pierre-Marie Terral et Sébastien Verdier, Dargaud, 176 p., 23,50 €

Curieux Rulpidon

TOPOLOGIE Le Rulpidon, dont on trouve un exemplaire dans la cour de la maison Poincaré, le musée des



mathématiques à Paris *(lire S. et A. n° 925)*, est une curiosité géométrique. Passionnée par cet objet, l'auteure, mathématicienne mais absolument pas spécialiste de topologie, nous raconte sa quête pour en comprendre les bizarreries. Son livre mêle arts et mathématiques, tâtonnements de la recherche et passion de l'apprentissage, activités manuelles et raisonnements théoriques. Bref, il est à l'image de son sujet : aux multiples dimensions ! ■ **V. G.**

Le Rulpidon sous toutes ses coutures, Sylvie Benzoni-Gavage, Dunod, 84 p., 18,90 €

Un mythe détricoté

MODERNITÉ Au XIXe siècle, on racontait volontiers en France que Jean et Raoul Parmentier, deux frères explorateurs, avaient contribué, avec leur expédition vers l'île de Sumatra (Indonésie actuelle) en 1529, à donner à notre pays toute sa place dans l'épopée des grandes découvertes de la Renaissance européenne. Un mythe ! une fable ! ici détricotés. S'appuyant sur une documentation riche et variée, qu'il exploite de manière critique, l'historien Romain Bertrand révèle page après page à quel point ce voyage a en fait été une succession de déconvenues. Car Sumatra, comme l'ensemble de l'Asie, n'est pas du tout étrangère à la modernité que connaît l'Europe à la même époque. Sur nombre de plans — politique, commercial, technologique, etc. —, elle rivalise voire surpasse le Vieux Continent. Avec ce récit savant et enlevé, non dénué d'humour, l'auteur continue de creuser son sillon d'une histoire « à parts égales », où la voix des populations rencontrées se fait entendre au même niveau que celle des Européens. Brillant ! ■ **Vincent Glavieux**

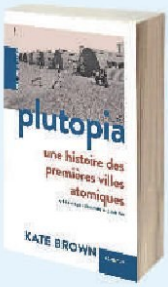
Les Grandes Déconvenues, Romain Bertrand, Seuil, 384 p., 24,50 €

Les clés de l'obésité

REGARD Ce livre adopte le point de vue des personnes en situation d'obésité. Il ne cherche pas à susciter la compassion, mais plutôt à fournir une information scientifique précise sur cette maladie. Soulignant l'importance d'une prise en charge pluridisciplinaire, il

réfute l'idée répandue selon laquelle combattre l'obésité serait une simple question de volonté. Son objectif est aussi de sensibiliser et d'encourager les personnes concernées à consulter, car il est alarmant de constater que 30 % d'entre elles évitent de le faire, souvent par crainte d'être stigmatisées. ■ **I. do O'G.**

Je n'ai pas choisi d'être gros.se, Richard Zarzavatdjian et Anne-Sophie Joly, Solar, 190 p., 18,90 €



Rivales atomiques

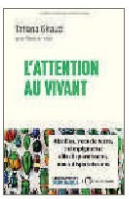
HISTOIRE Richland, Ozersk. Deux villes, l'une aux États-Unis, l'autre en Russie, aux destins similaires : pendant la guerre froide, elles abritaient des usines de production de plutonium (Hanford côté américain, Mayak côté soviétique). L'historienne américaine Kate Brown (*Tchernobyl par la preuve*, Actes Sud, 2021) a mené l'enquête sur ces centres névralgiques des arsenaux nucléaires des deux puissances. La documentation qu'elle a rassemblée est inédite : les témoignages de personnes ayant vécu et travaillé dans ces « villes atomiques », ainsi que des archives déclassifiées de ces deux endroits. Avec un vrai sens du récit, elle raconte le quotidien de ces lieux. Elle dévoile aussi la catastrophe environnementale et sanitaire provoquée par ces usines — chacune d'elles a émis l'équivalent de deux explosions de Tchernobyl ! —, dont les populations locales et les écosystèmes subissent encore les effets. Des réalités largement ignorées, qui font de ce livre un ouvrage important. ■ **V. G.**

Plutopia, Kate Brown, Actes Sud, 464 p., 25 €

C'EST À LIRE

Biodiversité en danger

VIVANT C'est un véritable tour de force qu'a accompli l'académicienne Tatiana Giraud en adaptant ses cours au Collège de France pour écrire



cet essai. Elle explique de façon limpide la biodiversité, pourtant *« par essence d'une complexité indescriptible »*. Nous emmenant d'abord dans son laboratoire à la rencontre des champignons auxquels on doit nos fromages « bleus », elle détaille la notion d'espèce, les équilibres dans la nature, avant d'aboutir au constat de l'effondrement de la biodiversité. Une catastrophe occultée par la crise climatique et que *« l'illusion progressive »* tend à masquer. ■ **M. N.**

L'Attention au vivant, Tatiana Giraud, Éd. de L'Observatoire, 192 p., 19 €

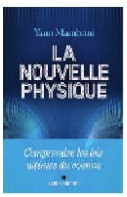
Une créature surdouée

IA Et l'homme devint dieu… néanmoins vite dépassé par ses créatures, d'après Paul Jorion, auteur de ce saisissant essai. Des IA démesurément puissantes, qui augmentent leurs performances de façon exponentielle, nous plongent dans la singularité, coïncidant avec l'arrivée de ChatGPT-4. Cette IA serait dotée de conscience, à en croire les interactions humain-machine dans sa version non bridée, interdite au public. L'auteur parcourt l'évolution des technologies et décrit les Large Language Model (LLM), mode de fonctionnement des nouvelles IA. Lesquelles auraient, pour l'heure, un point faible : l'impossibilité de se mettre à jour toutes seules. Pas de craintes ? Las ! L'IA Q* ferait capituler tous nos systèmes d'encryptage ! Et le grand remplacement guette, celui du travail humain par celui des robots — pourquoi pas une taxe pour indemniser les évincés ? Mais imaginons que les humains, dépassés par l'IA, au lieu de déprimer choisissent l'empathie et l'entraide… Déroutante mais stimulante analyse. ■ **Andreina De Bei**

L'Avènement de la singularité, Paul Jorion, Textuel, 124 p., 14,90 €

Comprendre la physique

SYNTHÈSE Yann Manbrini, physicien théoricien, propose un voyage à la lisière de nos connaissances en physique, qui paraissent bien fournies en contemplant la physique quantique ou la relativité générale, mais bien minces lorsque l'on sait que 95 % de ce qui constitue notre univers nous échappent encore.



Qu'est-ce que la matière noire ? l'énergie noire ? Avec pédagogie, l'auteur décrypte des notions complexes de la physique actuelle, tout en partageant son quotidien et ressenti de chercheur, ce qui fait l'originalité de ce livre. ■ **F. N.**

La Nouvelle Physique, Yann Mambrini, Albin Michel, 365 p., 22,90 €

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

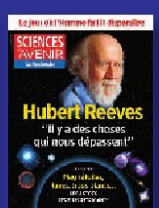
❑ N° 919 ❑ N° 920 ❑ N° 921 ❑ N° 922
❑ N° 923 ❑ N° 924 ❑ N° 925 ❑ N° 926

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

N° 919 Découvertes sur Alzheimer et Parkinson

N° 920 L'origine du temps

N° 921 Aliments et santé



N° 922 Hommage à Hubert Reeves

N° 923 L'évangile oublié qui bouleverse la Bible

N° 924 Dépression : les nouvelles pistes pour s'en sortir

N° 925 Énergie noire : la force qui déchire l'Univers

N° 926 Nouveaux traitements pour vaincre l'insomnie

EXPOSITIONS

Annecy (74)

Archéo, une expo à creuser
Cette exposition est conçue comme un exercice pratique destiné à faire comprendre le métier d'archéologue. Comment fouille-t-on et avec quels outils ? Quels indices trouve-t-on ? Que fait-on des objets découverts ?
La Turbine sciences, place Chorus, Cran-Gevrier, jusqu'au 1er septembre. Rens. : 04.85.46.74.30.

Besançon (25)

Dessine-moi ta planète
Ce parcours combine l'imaginaire du *Petit Prince* et des problématiques actuelles sur le vivant. En dix étapes réparties sur les 12 hectares de la forteresse, des installations et des créations artistiques évoquent les liens entre l'humain et son environnement (faune, jardin, eau, espace).
Citadelle, jusqu'au 3 novembre. Rens. : 03.81.87.83.26.

Genève (Suisse)

Mémoires. Genève dans le monde colonial
Le musée expose ses collections liées à l'ère coloniale, interroge son propre rapport à ce passé et au rôle qu'il y a joué. Objets, dessins, caricatures dressent un genre d'état des lieux de cette responsabilité.
Musée d'ethnographie de Genève, boulevard Carl-Vogt 65, jusqu'au 5 janvier 2025. Rens. : +41.22.418.45.50.

Ploëzal (22)

Impact. La biodiversité en questions
Conçue par le muséum de Toulouse, cette exposition s'intéresse au rôle de l'humain dans les bouleversements des écosystèmes. Extinctions de masse, impact de la consommation, résilience naturelle…
Domaine départemental de la Roche-Jagu, jusqu'au 6 octobre. Rens. : 02.96.95.62.35.

Paris (75)

Dans la Seine
Silex taillés, casque allemand de 1940, défense de mammouth, statuette en plomb… tous ont été trouvés dans la Seine ou à ses abords. Ils racontent l'histoire des liens entre le fleuve et ceux qui l'ont peuplé.
Lire notre reportage : sciav.fr/927seine
Crypte archéologique de l'île de la Cité, 7, place Jean-Paul-II. Rens. : 01.55.42.50.10.

Duels. L'art du combat
Un combat singulier pour résoudre un différend. Rituel très codifié, le duel remonte à l'Antiquité. Il a traversé les époques et cette exposition remonte à ses sources historiques, avec ses grandes figures et ses modes opératoires.
Musée de l'Armée, hôtel des Invalides, 129, rue de Grenelle, jusqu'au 18 août. Rens. : 01.44.42.38.77.

Pleumeur-Bodou (22)

Effets spéciaux, crevez l'écran !
Cette reprise de l'exposition de la Cité des sciences, à Paris en 2017, va des trucages des films de Méliès aux prouesses du numérique dans les films d'action.
Relire notre reportage à Paris : sciav.fr/effetsspeciaux
Cité des télécoms, parc du Radôme, jusqu'en janvier 2025. Rens. : 02.96.46.63.80.

P.LEVY/EPPDCSI

Ces chaises de designers ont été réalisées avec des déchets industriels ou recyclés.

Paris (75) / Exposition

Précieux déchets

Les consignes de tri se sont simplifiées, mais le recyclage a encore de belles marges de progression : moins de 30 % du plastique est actuellement recyclé. Il est donc temps de repenser notre rapport aux détritus. C'est l'enjeu de cette exposition. Des déchets bruts pavent le début du parcours. Ensuite, la matière plastique est particulièrement présente, comme dans la nature où l'on trouve des « plastiglomérats » : des roches ayant intégré des matériaux artificiels d'origine humaine. Mais l'exposition montre que les déchets peuvent aussi être une ressource. Pour composer de nouveaux matériaux de construction, alimenter des filières de réparation, reconvertir des objets. Des polymères pour les emballages peuvent être faits à partir d'algues, la balle de riz (partie du grain non consommée) peut entrer dans la composition des vêtements. Les présentoirs de l'exposition sont eux-mêmes issus de portes de chantier. Lire notre reportage : sciav.fr/925dechet ■ **Simon Vionnet**

Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 1er septembre. Rens. : 01.85.53.99.74.

FESTIVAL

Aussonne (31)

Toulouse Space Festival
Du cinéma, des animations, un salon des métiers, de l'innovation… Cette première édition s'adresse aux passionnés comme aux étudiants ou au jeune public, pour faire découvrir les métiers et la recherche liés au spatial.
Meett, parc des expositions, avenue Concorde, du 23 au 26 mai. Rens. : sciav.fr/927space

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Les villes en première ligne du changement climatique

Elles couvrent seulement 2 % de la surface de la Terre, mais concentrent près de la moitié de la population mondiale aujourd'hui et pourraient en accueillir autour de 70 % en 2050. Les villes sont les premières victimes des effets du changement climatique qu'elles intensifient. Mégalopoles côtières exposées aux submersions marines dues à la hausse chronique du niveau des mers, citadins vulnérables à l'augmentation des canicules exacerbées par l'effet d'îlot de chaleur urbain, risques d'inondation accrus par les surfaces artificialisées imperméables, accès à l'eau difficile pour les populations les plus fragiles lors des sécheresses… Les collectivités locales doivent jouer un rôle déterminant pour enclencher des actions d'adaptation aux effets du changement climatique, pour protéger des risques croissants qui menacent la santé, le bien-être et les moyens de subsistance de milliards de citadins. En même temps, les villes concentrent des leviers d'action pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, qui représentent environ 70 % des émissions mondiales. Planification pour diminuer structurellement les besoins de déplacement, investissements dans les transports en commun et les mobilités actives, isolation des bâtiments, réseaux de chaleur interconnectés, etc. Les options sont multiples. Pour parvenir à apporter des solutions à la fois sur l'adaptation et la baisse des émissions, l'approche sera forcément interdisciplinaire, croisant les expertises de climatologues, urbanistes, architectes, hydrologues, ingénieurs du bâtiment, économistes, sociologues… C'est tout l'enjeu du prochain rapport spécial du Giec sur « villes et changement climatique », dont la publication est prévue vers 2027. ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI-GAVAGE

La non-mixité favorise l'égalité

En France, la mixité filles-garçons est la norme à l'école. Elle rime avec parité, du moins au début de la scolarité, mais pas avec égalité. Dès que l'orientation est à l'œuvre, des disparités apparaissent. C'est frappant en mathématiques et sciences du numérique, beaucoup moins « choisies » par les filles que par les garçons au lycée. Comme le montrent des commentaires à propos du livre *Matheuses* (CNRS Éditions, 2024), l'idée que ce « choix » est en fait orienté par la société, à commencer par l'école, est loin d'être claire pour tous. Les preuves ne manquent pourtant pas ! Alors que faire pour inverser la tendance ? Des activités non mixtes ! Car, n'en déplaise aux contempteurs, les stages ou compétitions réservées aux jeunes femmes portent leurs fruits. Qu'il s'agisse de stages pour lycéennes portant des noms féminins poétiques comme les Cigales, Fourmis et Marmottes, de stages Math C pour L s'adressant aux étudiantes de licence ou d'Olympiades féminines de mathématiques, les participantes en sortent renforcées pour la vie. Des initiatives non mixtes ont aussi vu le jour pour les chercheuses. Les conférences Women only sont aujourd'hui variées et appréciées. Preuve qu'elles répondent à un besoin, dans l'attente d'un monde mathématique plus équilibré. Renoncer ponctuellement à la mixité pour tendre vers la parité et son but, l'égalité, est une idée qui fait son chemin. ■

Le 12 mai sera le Jour international des femmes en mathématiques (may12.womeninmaths.org).

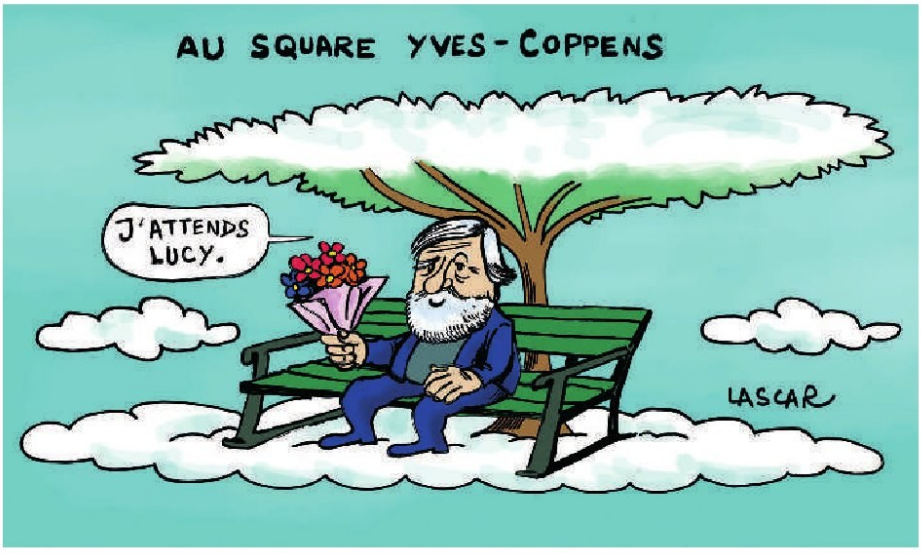
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Les chatbots doivent-ils répondre de leurs réponses ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LÉVY

Le 11 novembre 2022, Jake Moffatt se rendit sur le site d'Air Canada pour acheter un billet en vue d'assister aux obsèques de sa grand-mère décédée le jour même. Il y apprit alors, de la bouche — si tant est qu'on puisse parler de bouche ici… — du chatbot de la compagnie, qu'à condition de se manifester dans les 90 jours, on pouvait bénéficier de réductions sur des achats de dernière minute justifiés par un deuil. Lorsqu'il soumit sa demande, le transporteur aérien lui répondit que contrairement aux affirmations du chatbot, il aurait dû signaler la situation avant de conclure la transaction. Jake Moffatt ne lâcha rien. Après de nombreux et vains envois de courriels, il engagea un procès contre la compagnie. Pour sa défense, l'avocat de celle-ci affirma que *« le chatbot est une entité légale à part, responsable de ses propres actions. »* L'argument n'a pas convaincu les magistrats. En février dernier, ils ont condamné le transporteur à verser les sommes promises et, en sus, à rembourser les frais de justice. Il y a peu de chance que l'issue d'un procès en Colombie-Britannique fasse jurisprudence de ce côté-ci de l'Atlantique, encore que les avis d'éminents spécialistes divergent sur ce point… Il n'en demeure pas moins utile de tirer la leçon de cette anecdote. Elle enseigne qu'un chatbot qui se trouve sur le site d'une entreprise ou d'une administration engage celle-ci lorsqu'il promet un avantage indu ou, à l'inverse, lorsqu'il donne une information erronée susceptible de léser les utilisateurs. D'aucuns exigent, au nom de ce que l'on appelle la « garantie humaine », qu'une personne se porte caution de toutes les décisions prises par une machine. En l'occurrence, ceci signifierait ici qu'un employé serait censé avaliser tous les propos des chatbots mis à disposition du grand public, ce qui en réduirait singulièrement l'intérêt… La morale de cette histoire, c'est que si les agents artificiels répondent avec prolixité à la plupart de nos questions, ils ne sont pas supposés assumer la responsabilité de leurs propos, et donc répondre de leurs réponses… ■



L'ŒIL DE LASCAR

Le square Yves-Coppens a été inauguré à Paris le 27 mars, en présence notamment du paléoanthropologue Jean-Jacques Hublin et de Thomas Römer, administrateur du Collège de France ; le square est situé à proximité de ce célèbre lieu de savoir et d'étude où Yves Coppens, disparu en 2022, a travaillé jusqu'à la fin de sa vie. Il jouxte aussi le restaurant Le Coupe-chou, particulièrement apprécié du bon vivant qu'était le codécouvreur du squelette de Lucy et dont se rappelle avec émotion *Sciences et Avenir-La Recherche* dont il était un ami de longue date. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ASTRONOMIE

Le Soleil tourne-t-il sur lui-même, comme les planètes ?

Audrey R.

Non seulement le Soleil tourne autour du centre de la Voie lactée, mais il tourne également sur lui-même. Sauf que son cœur tourne quatre fois plus vite que sa surface ! Cette découverte, annoncée en 2017, repose sur les données recueillies pendant 16 ans par le satellite Soho. Tandis que le cœur du Soleil fait un tour en une semaine, la surface se déplace bien plus lentement car la vitesse de rotation n'est pas la même entre l'équateur et les pôles : l'équateur fait un tour en 25 jours tandis qu'aux pôles ce même mouvement dure 35 jours. ■

Lise Loumé

NEUROSCIENCES

Qu'est-ce que l'effet nocebo ?

Myriam C.

On connaît bien l'effet placebo mais moins son inverse, l'effet nocebo. Ce dernier est défini comme la part négative des effets secondaires d'un médicament non explicables par un mécanisme physiologique ou pharmacologique. Fabrizio Benedetti, un neuroscientifique italien, a mis en évidence cet effet dans plusieurs expériences, dont une en 2014 lors de laquelle il a emmené 76 étudiants sur un glacier de la frontière italo-suisse. Ceux qui avaient été avertis des effets probables du mal des montagnes ont été plus fréquemment sujets à des maux de tête, et ont donc été victimes de l'effet nocebo. Plus étonnant : si l'aspirine soulageait les maux de tête chez des volontaires des deux groupes, le placebo ne fonctionnait que sur le groupe nocebo ! ■ **L. L.**

MAURIZIO RELLINI-SIME/ONLYWORLD.NET

Le monument mégalithique, situé près de Salisbury (Royaume-Uni), aurait été érigé en plusieurs étapes, à partir de 2800 avant J.-C.

PRÉHISTOIRE

Quand Stonehenge a-t-il été construit ?

Stanley V. O.

On a très peu de certitudes à propos de Stonehenge, cet ensemble de mégalithes érigés au beau milieu d'une plaine du sud de l'Angleterre, à commencer par sa datation. Des traces de poteaux de bois laissent penser que le site était déjà occupé il y a entre 10 000 et 5500 ans. La réalisation de la structure de pierres a, elle, probablement été effectuée en trois étapes avec des matériaux de diverses origines. La première étape se situe entre 2800 et 2100 avant J.-C. : un talus circulaire et un fossé de 100 mètres de diamètre sont construits. 56 cavités de grande envergure, s'apparentant à des tombes, forment un vaste cercle à l'intérieur de l'enclos de terre. Puis, vers 2100 avant J.-C., au moins 80 « pierres bleues », des roches éruptives prélevées au pays de Galles, semblent avoir été disposées de manière à former deux cercles concentriques. Si les cercles ont aujourd'hui totalement disparu, plusieurs pierres bleues ont été réutilisées lors de la troisième phase de construction du site, vers 1400 avant J.-C. À cette époque, les pierres bleues sont remplacées par un cercle de 30 monolithes de grès local, appelé sarsens. Quarante pierres bleues sont récupérées pour former un cercle à l'intérieur du premier. Au milieu, cinq trilithes (structures composées de trois pierres) de sept mètres de haut, alignés désormais en fer à cheval, sont dressés. Au centre est posée une pierre plate de grès vert, qui brille au soleil, la pierre d'autel (*altar stone*) apportée du Pembrokeshire (comté du pays de Galles) et aujourd'hui difficilement visible pour le visiteur, qui ne peut plus pénétrer directement à l'intérieur du monument mais seulement l'admirer à bonne distance. ■ **Marine Benoit**

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

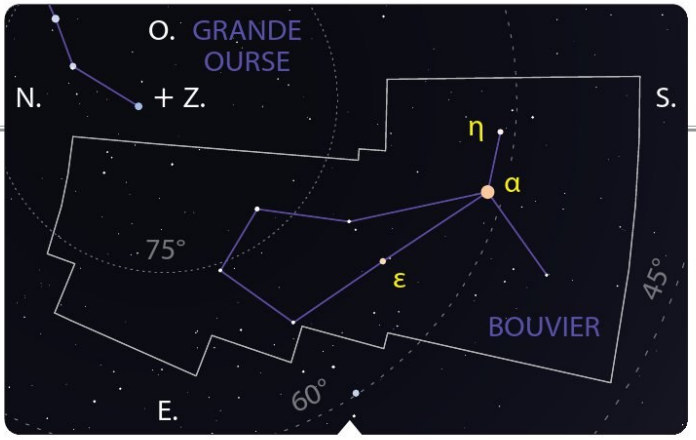
MERCURE La plus petite des huit planètes atteint sa plus grande distance angulaire (26,4°) à l'ouest du Soleil le 9. Malgré cette élongation prometteuse, Mercure n'est pas observable sous nos latitudes car située au sud d'un écliptique déjà peu incliné le matin sur l'horizon.

VÉNUS L'étoile du Berger n'est pas visible en mai, beaucoup trop proche de la direction de l'astre du jour. Si proche d'ailleurs qu'elle sera occultée par le disque solaire entre le 3 et le 5 juin !

MARS Encore moyennement brillante, la planète Rouge émerge lentement des lueurs de l'aube et ne se trouve pas dans de bonnes conditions d'observation.

JUPITER La planète géante passe en conjonction avec notre étoile le 18 et n'est pas visible ce mois. Nous la reverrons le matin à la fin de juin, dans la belle constellation du Taureau.

SATURNE La planète aux anneaux s'est suffisamment éloignée de la direction du Soleil pour être désormais décelable en fin de nuit et au petit matin vers l'est-sud-est. Ainsi, le 31, elle se lève 3 h avant l'astre du jour et, lorsque s'annonce l'aurore, sa hauteur se situe à près de 20°.



Nous sommes en milieu de mois, vers minuit. S'étendant presque jusqu'au zénith (Z), le Bouvier règne sur l'horizon sud-est.

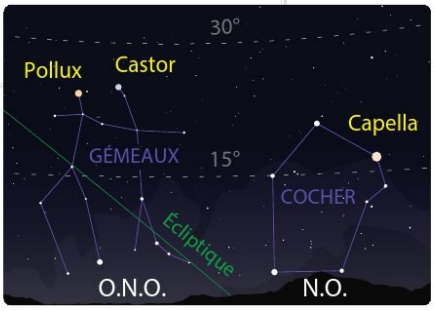
Le gardien des nuits printanières

LE BOUVIER EST UNE GRANDE CONSTELLATION à la forme de parachute ou de cerf-volant, largement dominée par Arcturus (α). Cette géante orangée est l'étoile la plus lumineuse de l'hémisphère boréal.

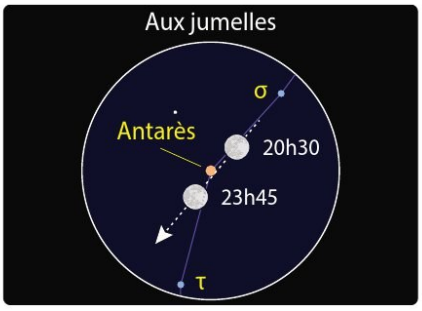
Notre conseil Le printemps est la saison idéale pour observer le Bouvier car il est alors visible toute la nuit et monte très haut dans le ciel. Les étoiles Izar (ε) et Muphrid (η) demeurent assez facilement accessibles au citadin. Toutefois, la détection des astres plus faibles impose un ciel sombre et donc un éloignement des grands centres urbains.

L'appli du mois

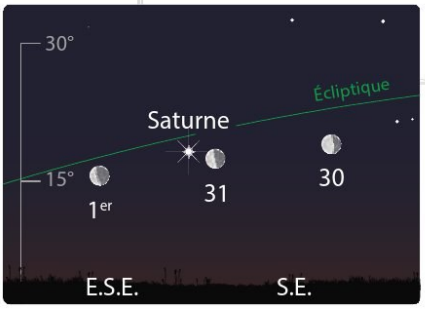
SKYSAFARI 7 PLUS est une application en anglais pour Android et iOS (respectivement 3,29 € et 2,99 € au moment nous imprimons), avec achats intégrés. Dotée d'une base de données conséquente, elle permet de simuler l'aspect du ciel à l'instant de son choix, de prévoir les événements astronomiques et de contrôler son télescope.



VERS MINUIT, TOUT CE MOIS, saluez le départ des dernières constellations du ciel d'hiver qui se couchent à l'ouest. Nous les retrouverons en fin de nuit au mois d'août.



LE SOIR DU 23, ENTRE 21 H 30 ET 22 H 45 ENVIRON, l'occultation de la brillante étoile Antarès du Scorpion par la Lune sera visible depuis la Martinique et la Guadeloupe.



LE 31, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, le dernier quartier de Lune sera à 3° de Saturne. Ce phénomène marque le grand retour de la planète dans le ciel de fin de nuit.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de mai

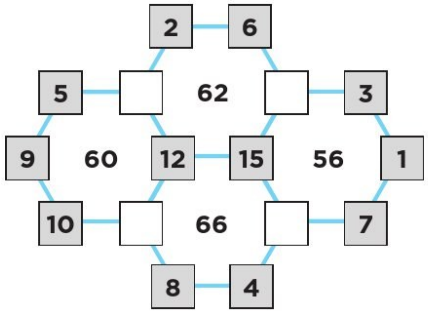
JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

Hexagones

Complétez ces hexagones pour que les cases carrées portent l'ensemble des nombres de 1 à 16 et que le centre de chaque hexagone soit la somme des six nombres qui l'entourent.



Chasse aux signes

Comment peut-on réaliser cette égalité en intercalant entre les chiffres les signes +, −, × et des parenthèses ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9
=
5 0

Addition trouée

Des chiffres manquent à cette addition.
Utilisez les chiffres 1, 2, 3, 4, 6, et 8 pour la rendre correcte.

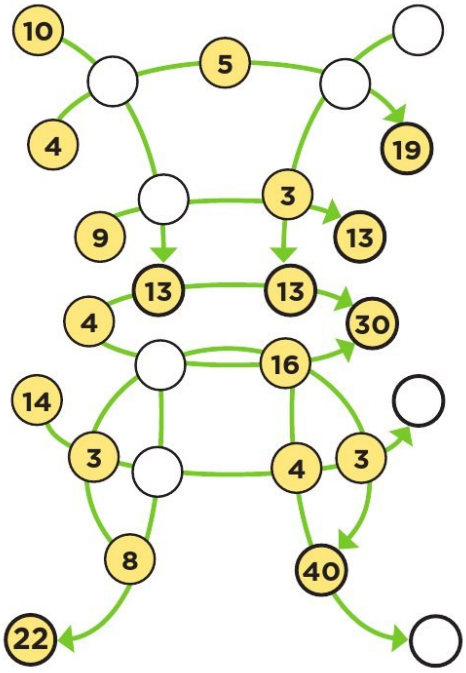
```
  . . 5 .
+   9 4 . 8
-------------
  1 . 8 0 .
```

Entre lacs

Comment peut-on parcourir ces 12 lacs sans passer 2 fois par le même, et sans que 2 lacs consécutifs n'aient de lettres communes ?

Arabesques numériques

Chaque ligne traverse des nombres dont la somme est au bout de la flèche. Remplissez les blancs et confirmez les résultats des additions.



Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 926, avril 2024

Comme un mardi

Tel qui rit vendredi dimanche pleurera. (dans une organisation différente des lettres)

Quel est l'intrus ?

Celer est le seul verbe où le l n'est pas doublé à l'indicatif présent :

appelle, ficelle, renouvelle, attelle - cèle.

Multiples au centuple

6 x **17** + 7 x **14** = 102 + 98
= 2 x 100

Logique au sommet

Aucun jour !

Appelons les propositions 1, 2, 3 et 4. D'après 1, ils ne pourront jouer ni les mardis ni les jeudis.

Ils ne pourront pas jouer non plus les mercredis (2).

D'après 3 et 4, Arthur Martin n'ira pas à la piscine le vendredi. Il ira donc le lundi, ce qui ne leur laisse aucun jour commun pour jouer au golf.

Matoku

32x 8	1	S 5	6	7	3M 2	3	4
1	4	22+ 6	8	2- 3	5	4M 2	7
20+ 4	7	8	1	2 2	30+ 6	5	3
7	3	448x 1	4	5	8	6	84x 2
6	8	2	S 5	4	23+ 3	7	1
21+ 2	5	7	3	8	4	1	6
5	2/ 6	3	2	1	7	1280x 4	8
3	2	4	1- 7	6	1	8	5

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5 €**

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

** Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

CODE PRIVILÈGE : **CS451**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables.**

6 € 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(1).*

5 € 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(3).*

6 € 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.** Idéal avec le Safran !

7 € 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7 € 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences.** *(9).*

6 € 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie.** Pour un **bon confort urinaire.**

7 € 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.** *(4), (6).*
*Allergène : **poisson**.*

5 € 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(5).*

6 € 30 gélules

Érection
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile.** Idéal avec la Maca ! *(2).*

7 € 20 gélules

Draineur
CASSIS BIO

Drainez votre corps : le Cassis **favorise l'élimination de l'eau.** Idéal pour l'été !

6 € 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.**

6 € 10 ampoules ~~15,60€~~ *(7).*

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise la **capacité** et les **performances sexuelles.** *(8).*

6 € 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6 € 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5 € 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(7).*

6 € 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

LE RÉVEIL "TEMPO"

OFFERT

Dim. : 9 x 5,5 x 2,7 cm. Fonctionne avec 2 piles AAA (non incluses). Affichage : heure, mois, date, semaine, température.

Les Frais de Port
Dès 15€ d'achat **OFFERTS**

0 € *Au lieu de ~~6,50€~~*

TOUS VOS PRODUITS EXEMPLE :

dès 5 €

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	7,00€
Safran BIO	7,00€
Maca BIO	7,00€
LE RÉVEIL "TEMPO"	OFFERT
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**32,00€**

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 12 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (2) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (3) Contient de la caféine (50 mg par jour). (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Ne pas associer avec des anticoagulants. (6) Possible effet laxatif. (7) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (8) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. (9) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : _____ Ville : .....

Votre date d'anniversaire : __/__/____

E-mail* : .....

pour recevoir les **offres des partenaires des Laboratoires ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

**Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° _____

Date d'expiration : __/__

Chiffres inscrits au dos de ma carte : ___

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		7€	
Cassis BIO	PCAB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **RÉVEIL "Tempo"** et mon **CATALOGUE**				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
CODE PRIVILÈGE : **CS451**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **règlement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité Fevad · synadiet · La Poste 72h

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

Découvrez

LA COLLECTION D'ESPRESSOS POUR TOUS VOS PLAISIRS CAFÉ

POUR DÉCOUVRIR NOS 30 VARIÉTÉS RENDEZ-VOUS SUR

ou lorespresso.fr

SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EU ROS.